

UNIVERSITE DE LIEGE
Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Education

**ETUDE DES PROCESSUS VISUO-
PERCEPTIFS DANS LE
DEVELOPPEMENT TYPIQUE ET LA
PARALYSIE CEREBRALE**

Emilie Schmetz

Thèse présentée en vue de l'obtention du titre de
Docteur en Sciences Psychologiques et de l'Education

Sous la direction de Laurence Rousselle et de Jean-Jacques Detraux

Jury de thèse composé de *Koviljka Barisnikov, Elisa Fazzi, Steve Majerus et Jean-Paul Misson*

2017-2018

à Michaël, Eline et Alice

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes promoteurs de thèse, le Professeur émérite Jean-Jacques Detraux qui m'a donné l'opportunité de débiter cette thèse et qui me soutient sans relâche depuis le premier jour d'octobre 2008 et la Professeure Laurence Rousselle qui nous a rejoint dans cette aventure cinq ans plus tard. Je vous remercie d'avoir cru en ce projet et de m'avoir suivi et soutenu dans ce travail de très longue haleine.

Je tiens également à remercier les membres de mon comité d'accompagnement de thèse, la Professeure Koviljka Barisnikov pour son soutien, ses remarques pertinentes, sa patience et sa disponibilité et le Professeur Jean-Paul Misson pour son aide et ses encouragements.

Je désire également adresser mes remerciements à la Professeure Fazzi et au Docteur Majerus d'avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Je tiens à exprimer ma gratitude à la Fondation belge de la Vocation qui a cru dans mon projet dès 2009 en permettant le financement et la création du matériel d'évaluation. Je remercie également Monsieur Théo Legrand qui a porté mon projet au sein de l'Association Nationale d'Aide au Handicap et au sein des clubs Rotary de Seraing, de Liège Chaudfontaine, de Jemeppe, de Liège Bierset et de Flémalle. Ce soutien financier a permis l'évaluation de tous les enfants. Enfin, j'exprime ma gratitude au Fonds de soutien Marie- Marguerite Delacroix qui a financé deux ans de recherche à temps plein afin de mener ma thèse à son terme.

Je suis extrêmement reconnaissante à tous les enfants et leurs familles pour leur temps, leur disponibilité et leur confiance sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible. Je remercie également le CIRICU, le CIMC et le CBIMC pour leur collaboration au cours des années.

Je souhaite également remercier de tout mon cœur Michaël, mon compagnon et Eline et Alice, nos deux filles, pour leur soutien sans faille, leur patience et leur amour qui m'ont permis de tenir durant toutes ces années sans baisser les bras. Merci d'avoir accepté de mettre nos vies entre parenthèses à de nombreux moments, juste pour

mon projet. Je remercie également mes parents et ma famille qui m'ont soutenu sans compter afin que ce projet aboutisse.

Un grand merci à Audrey Maudoux, ma meilleure amie depuis la maternelle, pour son amitié, son soutien et sa disponibilité malgré son doctorat, son post-doctorat et les deux années passées à l'étranger ! Je la remercie également d'avoir été mon modèle, peut-être sans le savoir, pendant nos longues années d'étude.

Je remercie mes amies, Laurie Bricteux, Magali Ngawa et Aurélie Geuquet, pour leur soutien et surtout pour tous ces moments passés ensemble qui ont permis, ne fut-ce qu'un instant d'oublier la thèse et de profiter du moment présent. Merci à vous.

Enfin, mes remerciements vont également à mes collègues du CIRICU et du service de neuropsychologie (elles se reconnaîtront sans aucun doute) pour leur soutien et leurs conseils, sans oublier tous ces petits moments qui me permettaient de sortir la tête de ma thèse.

Je fais un dernier petit clin d'œil à Betty Salmon, ma professeure de grec pendant mes études secondaires qui, grâce à ses cours passionnés et passionnants, m'a donné le goût des études et de la persévérance.

Le 8 janvier 2017

TABLE DES MATIERES

GLOSSAIRE	1
INTRODUCTION	7
PREAMBULE	9
PARTIE THEORIQUE	13
CHAPITRE 1 LES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS	15
DEFINITIONS	15
LES DEUX VOIES D'ANALYSE VISUELLE	17
LES MODELES ADULTES DE RECONNAISSANCE VISUELLE DES OBJETS	19
LES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS CHEZ L'ENFANT	28
CHAPITRE 2 LA PARALYSIE CEREbraLE	33
DEFINITIONS	33
CLASSIFICATION	35
LES TROUBLES OPHTALMOLOGIQUES	48
LES TROUBLES NEUROVISUELS	51
LES TROUBLES COGNITIFS	57
CHAPITRE 3 LES TROUBLES VISUO-PERCEPTIFS CHEZ LES ENFANTS AVEC PARALYSIE CEREbraLE	65
CHAPITRE 4 SPECIFICITES DE L'EVALUATION DE L'ENFANT AVEC PARALYSIE CEREbraLE	71
PARTICULARITES DE L'EVALUATION DES FONCTIONS VISUELLES SUPERIEURES	73
PARTIE EXPERIMENTALE	79

THE BEVPS: A NEW TEST BATTERY TO ASSESS VISUAL PERCEPTUAL AND SPATIAL PROCESSING ABILITIES IN 5-14 YEAR-OLD IN CHILDREN. **87**

INTRODUCTION	89
METHODS	96
RESULTS	110
DISCUSSION	118

BASIC VISUAL PERCEPTUAL PROCESSES IN CHILDREN WITH TYPICAL DEVELOPMENT AND CEREBRAL PALSY: THE PROCESSING OF SURFACE, LENGTH, ORIENTATION AND POSITION. **125**

INTRODUCTION	127
EXPERIMENT 1	131
EXPERIMENT 2	144
GENERAL DISCUSSION	157
APPENDICES	159

OBJECT RECOGNITION IN CHILDREN WITH TYPICAL DEVELOPMENT AND CEREBRAL PALSY: FOCUS ON INTEGRATIVE PROCESSING. **167**

INTRODUCTION	169
EXPERIMENT 1	175

INCOMPLETE FIGURES **182**

EXPERIMENT 2	188
GENERAL DISCUSSION	204
APPENDICES	206

VIEW-INDEPENDENT OBJECT REPRESENTATION AND ACCESS TO STORED STRUCTURAL KNOWLEDGE IN CHILDREN WITH TYPICAL DEVELOPMENT AND CEREBRAL PALSY **213**

INTRODUCTION	215
EXPERIMENT 1	219
EXPERIMENT 2	232

GENERAL DISCUSSION	247
APPENDICES	249
<u>DISCUSSION GENERALE</u>	<u>255</u>
SYNTHESE DES RESULTATS	257
LA BEVPS : OUTIL D'EVALUATION DES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS, INTERETS, LIMITES ET UTILISATION CLINIQUE.	261
LE DEVELOPPEMENT TYPIQUE DES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS	268
AU SEIN DE LA PARALYSIE CEREbraLE,	274
INFLUENCE DES DIFFERENTES CARACTERISTIQUES SUR LES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS	278
IMPLICATIONS CLINIQUES	287
LIMITES ET PERSPECTIVES	295
<u>CONCLUSION</u>	<u>297</u>
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	<u>299</u>

GLOSSAIRE

GLOSSAIRE

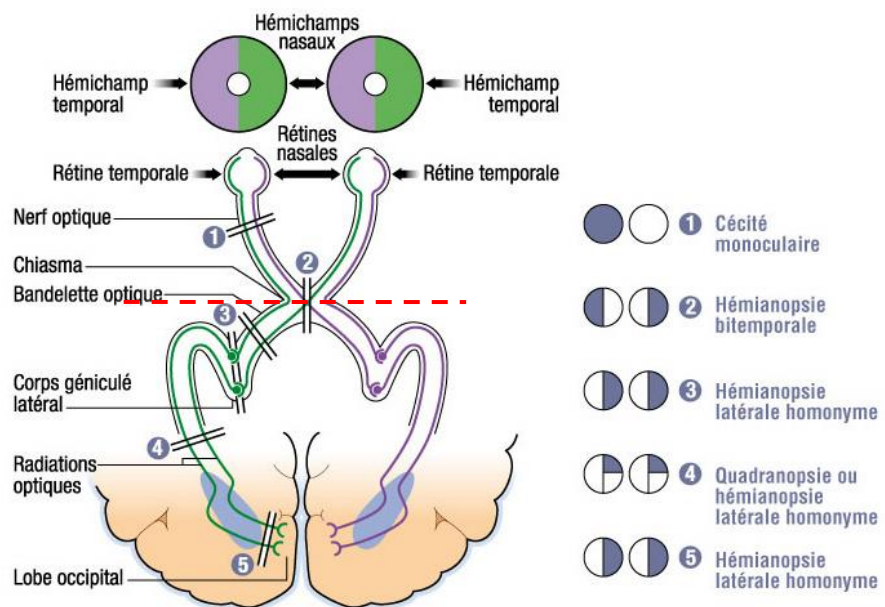


Figure 1. Schéma des voies visuelles pré-chiasmatiques (fonctions ophtalmologiques) et post-chiasmatiques (fonctions neurovisuelles) (Farge, 2012)

Champs visuels : étendue de l'espace perçu par le regard lorsque les yeux sont fixes droits devant. Cet espace perçu est de 180° sur le plan horizontal, de 45-50° vers le haut et de 60-80° vers le bas. Les atteintes des champs visuels dépendent de la topographie des atteintes des voies visuelles post-chiasmatiques telles que présentées au sein de la figure ci-dessus.

Cognition visuelle : troisième composant des fonctions neurovisuelles, incluant les fonctions cognitives permettant la sélection (attention sélective visuelle et exploration visuelle) et le traitement des informations visuelles (traitements visuo-perceptifs et visuo-spatiaux)

Fonctions neurovisuelles : ces fonctions dépendent des voies visuelles post-chiasmatiques et impliquent trois niveaux de traitement différents : les champs visuels et l'oculomotricité permettant la saisie des informations visuelles et la cognition visuelle permettant le traitement de ces informations visuelles.

Fonctions oculaires : fonctions ophtalmologiques, fonctions liées à l'intégrité de l'œil. Elles incluent la réfraction oculaire (déviation du rayon lumineux qui traverse l'œil avant de converger vers la rétine) dont les troubles sont la myopie, l'hypermétropie et l'astigmatisme ; les axes visuels dont l'absence de parallélisme provoque le strabisme ; et la motilité oculaire permettant le déplacement des yeux de manière coordonnée au sein des différents quadrants.

Fonctions visuelles supérieures : Elles comprennent les fonctions cognitives permettant la sélection (attention sélective visuelle et exploration visuelle), le traitement (traitements visuo-perceptifs et visuo-spatiaux) et l'utilisation (guidance visuelle du mouvement) des informations visuelles afin d'interagir avec l'environnement.

Guidance visuelle du mouvement : ensemble de processus, dépendant de la voie du comment, qui utilisent les informations visuelles perceptives et spatiales afin d'interagir correctement avec l'environnement et les différents objets qui le composent. Ces processus comprennent d'une part l'intégration visuo-motrice et d'autre part les traitements visuo-constructifs.

Intégration visuo-motrice : processus permettant l'utilisation des données visuelles pour la préparation et le contrôle des mouvements et des gestes tels que l'atteinte et la saisie d'objets avec la main dont l'ouverture des doigts est adaptée à la taille de ces objets, l'atteinte de ces objets en évitant de heurter les autres objets de l'environnement en déplaçant uniquement le bras et la main ou le corps entier, ou encore la coordination du geste pour la réalisation de tracés sous contrôle visuel.

Oculomotricité : coordination des muscles oculaires pour une utilisation fonctionnelle du regard, incluant la fixation (capacité de maintenir son regard à un endroit déterminé), l'exploration visuelle (le regard se porte dans les différents quadrants visuels), les saccades oculaires (orientation rapide du regard pendant laquelle les yeux sautent de la fixation d'un objet à la fixation d'un autre objet) et la poursuite oculaire (maintien de la fixation sur un objet en mouvement).

Processus visuo-attentionnels : ces processus incluent d'une part les capacités d'attention sélective visuelle permettant la discrimination des informations pertinentes parmi des distracteurs, et d'autre part les capacités d'exploration visuelle permettant l'analyse des différents quadrants visuelles afin de sélectionner les informations pertinentes.

Reconnaissance : ensemble des processus dépendant de la voie occipito-temporale « ventrale » (voie du quoi), permettant d'accéder à l'identité de l'objet présenté visuellement, d'une part grâce aux processus perceptifs menant à la construction d'un percept (ce que nous dénommerons processus visuo-perceptifs tout au long de ce travail de thèse) et d'autre part grâce aux processus associatifs qui font le lien entre ce percept et l'ensemble des connaissances (structurales, sémantiques et phonologiques) stockées en mémoire à long terme.

Traitements perceptifs : ensemble de processus permettant l'analyse des informations visuelles, d'une part grâce aux processus de reconnaissance permettant d'établir leur identité complète et d'autre part grâce aux traitements visuo-spatiaux permettant d'établir leur localisation et orientation dans l'espace.

Traitements visuo-constructifs : processus permettant la reproduction d'un modèle en deux ou trois dimensions grâce au graphisme ou la manipulation et l'assemblage de différents types de pièces afin de construire le modèle présenté. Ces processus nécessitent donc une étape d'intégration des différentes informations visuelles préalable à l'étape de production motrice.

Traitements visuo-spatiaux : ensemble de processus dépendant de la voie occipito-pariétale « dorsale » (voie du où) permettant d'établir la localisation et l'orientation dans l'espace des objets mais aussi de déterminer à quelle distances ces objets sont placés par rapport à notre corps et par rapport aux autres objets présents dans l'environnement.

INTRODUCTION

PRÉAMBULE

La vision joue un rôle essentiel dans le développement moteur, cognitif, émotionnel et social de l'enfant dès son plus jeune âge (Guzzetta, Mercuri, & Cioni, 2001). L'ensemble des processus visuels sont impliqués dans la mise en place du contrôle postural et gestuel, dans les interactions sociales (échanges d'informations non verbales, reconnaissance des visages et des émotions) et dans la construction des représentations spatiales dès les premiers déplacements. Durant la scolarité, ces processus visuels sont également impliqués dans l'apprentissage de la lecture (identification des mots et suivi des lignes), de l'écriture (coordination des mouvements des yeux et de la main) et des mathématiques (dénombrement, calcul écrit, comparaison des quantités et géométrie).

Ces processus visuels, pourtant essentiels au développement, peuvent être atteints à des degrés divers chez les enfants présentant des troubles neuro-développementaux tels que la paralysie cérébrale (Stiers, De Cock, & Vandenbussche, 1999), l'épilepsie (Bouis, Cavézian, & Chokron, 2011), la prématurité (Larroque et al., 2008) et les syndromes génétiques comme le syndrome de Williams (Thibaut & Fayasse, 2009) ou la micro-délétion 22q11.2 (Oskarsdóttir, Belfrage, Sandstedt, Viggedal, & Uvebrant, 2005). On parle alors de troubles neurovisuels (en anglais : Cerebral Visual Impairment, CVI).

Les enfants avec paralysie cérébrale (PC) sont particulièrement vulnérables aux troubles neurovisuels car ils partagent des étiologies communes dont les plus fréquentes sont les épisodes d'hypoxie néonatale et la prématurité. Le profil cognitif des enfants atteints de PC est généralement marqué par des troubles visuo-perceptifs importants. Les difficultés scolaires qui en résultent sont bien connues : ces enfants montrent fréquemment des difficultés de perception et d'intégration des informations visuelles présentées en classe (ex. orientation des lignes, reconnaissance des formes et des caractères), de construction d'une représentation dans l'espace, d'imagerie mentale et d'interprétation des schémas et graphiques (Mazeau & Lostec, 2010). L'apprentissage des gestes de la vie quotidienne (utiliser des couverts, s'habiller) est souvent laborieux et est marqué par un retard et une maladresse persistante.

La pathologie perceptive visuelle d'origine cérébrale de ces enfants s'aggrave avec les expériences visuelles et motrices pathologiques accumulées au cours du temps. Ils en viennent à développer une représentation de leur environnement très différente de celle des enfants au développement typique, laquelle est à l'origine de nombreuses difficultés dans leur vie quotidienne et dans leur parcours scolaire. Leurs difficultés visuo-perceptives sont donc profondément ancrées dans leur développement et conditionnent les apprentissages futurs (Zabalia, 2004). Une meilleure connaissance des troubles visuo-perceptifs est donc cruciale pour parvenir à repérer le plus tôt possible les difficultés de ces enfants. Mieux les comprendre devrait permettre de mieux cibler les prises en charge et de justifier les aménagements à mettre en place au cours de leur scolarité. À l'heure actuelle, la littérature fait état d'un manque de consensus quant à la nature des processus de traitement visuo-perceptif. La diversité des conceptions se traduit non seulement par une importante hétérogénéité au niveau de la terminologie utilisée pour qualifier les troubles mais également au niveau de la manière dont les processus de traitement sont opérationnalisés dans les évaluations. La façon dont s'articulent les traitements perceptifs et moteurs demande également à être clarifiée. À l'heure actuelle et en l'absence de cadre théorique unifié, il est donc difficile de dresser un tableau clair des troubles visuo-perceptifs chez les enfants avec paralysie cérébrale.

Dans ce contexte, l'objectif principal de ce travail de thèse est de contribuer à définir plus précisément les troubles visuo-perceptifs présents chez les enfants avec paralysie cérébrale grâce au développement d'une batterie de tests spécifiquement adaptée à leurs pathologies neuro-motrices. De plus, le développement typique de ces processus est mis en évidence afin de comparer le fonctionnement de ces processus dans le développement typique et atypique.

Ce travail de thèse s'articule donc en deux parties.

La **première** partie a pour objectif de présenter la Batterie d'Evaluation des fonctions Visuo-Perceptives et Spatiales chez l'enfant (BEVPS). Cette batterie a été créée au début de la thèse dans le but de pouvoir étudier distinctement les différents processus visuo-perceptifs chez les enfants présentant une pathologie neuro-motrice. Dans cet objectif, les modes de réponses motrice et orale et les consignes orales sont simplifiés, les temps de présentation des stimuli visuels ne sont pas limités et la cotation est réalisée sur base de scores spécifiques à chaque processus et non pas sous la forme de quotient global. Plus précisément, l'**étude 1** présente les différents tests de la BEVPS et leur validité au sein d'un échantillon d'enfants au développement typique.

L'objectif de la **deuxième** partie de cette thèse est double. D'une part, nous avons voulu définir le développement typique des différents processus visuo-perceptifs évalués grâce aux tests de la BEVPS. D'autre part, nous avons cherché à déterminer dans quelle mesure les enfants avec paralysie cérébrale présentent des déficits spécifiques ou globaux en comparaison avec des pairs au développement typique et si les trajectoires développementales des enfants avec PC montrent un retard développemental, persistent ou non. L'**étude 2** a permis l'évaluation des caractéristiques visuelles de base (longueur, surface, orientation et position), l'**étude 3** a évalué les processus intégratifs (discrimination figure-fond, groupement perceptif, traitement local-global), c'est-à-dire les représentations de l'objet dépendantes du point de vue et l'**étude 4** a examiné les processus transformatifs incluant les représentations indépendantes du point de vue (constance d'objets) et l'accès aux représentations structurales stockées en mémoire (décision d'objets).

Néanmoins, nous proposons une synthèse théorique des recherches réalisées dans ces différents domaines avant de présenter la partie expérimentale de ce travail.

PARTIE THEORIQUE

Basée en partie sur l'article

« Le point sur les processus visuo-perceptifs chez les enfants
atteints de paralysie cérébrale »

Schmetz E., Rousselle L.

Revue de Neuropsychologie 2016 ; 8 (2) : 137-49

CHAPITRE 1

LES PROCESSUS VISUO- PERCEPTIFS

L'objectif de ce chapitre est d'introduire le concept de processus visuo-perceptifs en partant de leur définition et de leurs différentes terminologies. Nous aborderons ensuite les modèles théoriques de référence chez l'adulte et les représentations qui en découlent chez les enfants.

DÉFINITIONS

La perception visuelle est la capacité à interpréter son environnement immédiat grâce à l'analyse des informations provenant de la lumière et transmises des yeux jusqu'au cerveau (Dutton, 2015). Dans son acception plus restreinte, les processus visuo-perceptifs sont impliqués dans la détection, le traitement et la reconnaissance des éléments visuels et sont pris en charge par la voie ventrale, occipito-temporale (Chaix & Albaret, 2014; Chokron, 2015; Humphreys & Riddoch, 1987b; Irani, 2011; Mazeau & Pouhet, 2014). Dans ce cadre, de nombreux auteurs s'accordent pour dire que les processus visuo-perceptifs impliquent deux étapes : les processus perceptifs et les processus associatifs des éléments visuels (Chokron, 2015; Humphreys & Riddoch, 1987b; Mazeau & Pouhet, 2014; Stiers et al., 2001).

Néanmoins, d'autres auteurs parlent des traitements visuo-perceptifs dans une acception beaucoup plus large, et utilisent cette terminologie pour désigner non seulement les processus de reconnaissance des objets mais aussi les traitements

visuo-spatiaux, visuo-constructifs et visuo-moteurs (Fazzi et al., 2004, 2009; Stiers et al., 2001; Stiers, Vanneste, Coene, & Vandenbussche, 2002).

Malgré l'importante hétérogénéité des conceptions et de la terminologie utilisée par les différents auteurs pour qualifier les processus visuo-perceptifs, les troubles de la reconnaissance visuelle reflètent pour tous une incapacité à analyser et intégrer les informations visuelles (Chokron, Cavézian, & de Agostini, 2010; Fazzi et al., 2004; Mazeau & Pouhet, 2014; Stiers et al., 2001). Plus spécifiquement, les dysgnosies, en référence aux agnosies visuelles chez l'adulte (Righi & Tarr, 2011), sont définies par Mazeau & Pouhet (2014) comme un trouble développemental de la reconnaissance d'éléments visuels tels que les objets, les images, les visages et les signes conventionnels écrits. Néanmoins, cette terminologie n'est pas partagée par les autres auteurs (Chokron et al., 2010, 2015 ; Fazzi et al., 2004, 2007). Si la définition des troubles de la reconnaissance visuelle fait l'objet d'un consensus relatif dans la littérature, les troubles visuo-perceptifs, aussi appelés troubles de la cognition visuelle par Chokron (2015), peuvent renvoyer à des significations différentes selon les auteurs. En effet, pour Chokron (2010), les troubles de la cognition visuelle recouvrent, isolément ou en association, des déficits d'attention et d'exploration visuelle, des troubles de la reconnaissance visuelle et/ou des atteintes des traitements visuo-spatiaux et visuo-moteurs mais n'intègrent pas les troubles visuo-constructifs. Fazzi (2004, 2007, 2009) est encore plus restrictive puisqu'elle exclut aussi les déficits d'attention visuelle et d'exploration visuelle de sa définition des troubles visuo-perceptifs.

En revanche, pour Stiers (2001, 2002), les troubles visuo-perceptifs englobent les troubles de la reconnaissance visuelle, les déficits visuo-spatiaux et visuo-constructifs mais ne comprennent pas les troubles visuo-moteurs. Chaix et Albaret (2014) intègrent les quatre types de troubles, visuo-perceptifs, visuo-spatiaux, visuo-moteurs et visuo-constructifs au sein de leur conceptualisation « troubles des habiletés non verbales ». Enfin, Dutton (2015), sous l'appellation « troubles de la cognition visuelle », englobe les troubles des processus de reconnaissance des objets et des processus visuo-spatiaux, troubles consécutifs à des lésions ou des dysfonctionnements des deux voies visuelles, ventrale et dorsale.

LES DEUX VOIES D'ANALYSE VISUELLE

La vision possède deux fonctions principales. D'une part, la vision pour la perception permet la reconnaissance et l'identification des objets, des personnes et des scènes naturelles et dépend de la voie ventrale, occipito-temporale. D'autre part, la vision pour l'action permet le guidage visuel des actions grâce à l'analyse des informations visuo-spatiales et la planification visuo-motrice. Elle dépend de la voie dorsale, occipito-pariétale (Milner & Goodale, 2008). Ces deux fonctions visuelles sont coordonnées dans les tâches de la vie quotidienne mais sont fréquemment dissociées en cas de lésions cérébrales congénitales ou acquises (Gunn et al., 2002; Jeannerod & Jacob, 2005; Riddoch et al., 2004; Van Braeckel et al., 2008).

La voie ventrale (voie du Quoi) transforme les inputs visuels en représentations perceptives. Ces représentations perceptives prennent en compte les caractéristiques des objets et leurs relations spatiales et restent stables malgré les transformations spatiales et temporelles des objets et des scènes visuelles. Elles sont construites après les étapes de ségrégation d'une scène visuelle en ses différents constituants (dont les objets) et de répartition des caractéristiques visuelles à chacun des objets présents au sein de cette scène. Elles permettent l'identification de l'objet grâce à leur appariement avec les représentations stockées en mémoire. La voie ventrale représente donc le monde visuel grâce à un cadre de référence indépendant du point de vue, permettant ainsi une prise de conscience de la structure constante du monde visuel. Les caractéristiques et les significations des objets y sont encodés par rapport à eux-mêmes et aux objets extérieurs (Bruno & Paolo Battaglini, 2008; Creem & Proffitt, 2001; Jeannerod & Jacob, 2005; Milner, Goodale, & Vingrys, 1995).

La voie dorsale permet la localisation des objets dans l'environnement (voie du Où) et la guidance visuelle du mouvement (voie du Comment). Elle n'est donc pas uniquement impliquée dans la vision pour l'action mais également pour la discrimination et la localisation des cibles orientées. La voie dorsale utilise les informations visuelles disponibles (localisation, orientation et taille des objets) qu'elle transforme en coordonnées égocentriques (par rapport à l'observateur) pour programmer et contrôler les mouvements nécessaires pour mener cette action à bien, mais n'intervient pas dans la sélection des actions appropriées. Les observateurs et les objets restent rarement statiques les uns par rapport aux autres, les coordonnées

égocentriques changent donc continuellement. Les informations de l'objet cible doivent donc être analysées en temps réel (ici et maintenant) au moment précis où les mouvements sont réalisés (Bruno & Paolo Battaglini, 2008; Creem & Proffitt, 2001; Milner & Goodale, 2008; Milner et al., 1995).

Les voies ventrale et dorsale utilisent les mêmes objets, les mêmes informations spatiales mais elles les transforment différemment, dans des buts distincts. Ces deux voies visuelles sont intégrées fonctionnellement dans la reconnaissance des objets, indépendante du point de vue grâce à l'utilisation d'informations en trois dimensions, extraites via la voie dorsale mais exploitées par la voie ventrale. L'intégration de ces caractéristiques élémentaires grâce aux deux voies visuelles permet au percept d'exister en tant qu'entité ayant du sens. Différents cadres de référence sont requis pour représenter les objets en fonction des buts de l'observateur à la fois dans la voie dorsale pour sa préhension et dans la voie ventrale pour son identification. Les caractéristiques extrinsèques de l'objet (par exemple : sa position dans l'espace) sont représentées dans des coordonnées égocentriques en lien avec la position de l'observateur, alors que les caractéristiques intrinsèques de cet objet (par exemple : sa taille) sont représentées dans des coordonnées centrées sur l'objet lui-même, indépendantes de l'observateur. Enfin, la modalité temporelle joue également un rôle important dans le traitement des informations. En effet, la réalisation d'une action nécessite des mises à jour continues du cadre de référence égocentrique alors que la reconnaissance des objets se base sur des représentations invariables de ces objets (Creem & Proffitt, 2001; Farivar, 2009; Jeannerod & Jacob, 2005; Milner et al., 1995).

LES MODÈLES ADULTES DE RECONNAISSANCE VISUELLE DES OBJETS

Le modèle de Marr et Nishihara (1978)

Ce modèle sériel et hiérarchique comprend trois niveaux d'analyse qui aboutissent à une description des différentes parties de l'objet et de leur organisation relative dans un cadre de référence centré sur l'objet lui-même. Cette description constitue le format de représentation de l'objet en mémoire à long terme. La reconnaissance visuelle de l'objet a lieu quand cette description perceptive peut être appariée à une représentation mnésique.

Pendant l'ébauche primitive (primal sketch), les bords de l'objet deviennent explicites sur base des caractéristiques de surface, grâce à la description des discontinuités de l'intensité lumineuse en termes de coins, d'orientations des bords, d'intersections, de textures et de couleurs.

Ensuite, la représentation de l'objet en 2D½, centrée sur l'observateur, permet une organisation plus élaborée de ces caractéristiques. Néanmoins, cette représentation correspond à la surface visible de l'objet dans une position donnée par rapport à l'observateur. Elle varie donc en fonction des déplacements de l'observateur autour de lui.

Enfin, la représentation de l'objet en 3D est centrée sur l'objet et non plus sur l'observateur. De ce fait, la description de l'objet est réalisée dans son propre système de coordonnées, permettant ainsi la construction d'un modèle 3D. Ce modèle permet de structurer l'objet en composantes volumétriques (dénommés cônes généralisés) dont l'arrangement spatial ne peut représenter qu'un seul objet. La description de l'axe principal de l'objet fournit des informations sur la taille et l'orientation de la forme globale. Ensuite, la description des composantes principales spécifie leur forme, longueur et épaisseur et l'arrangement spatial des axes de ces composantes. La reconnaissance de l'objet est définie comme l'appariement entre le modèle 3D construit avec les cônes généralisés et un des modèles 3D stockés en mémoire à long terme (Bruce, Green, & Bruyer, 1993; Marr, 1982; Marr & Nishihara, 1978).

La force de ce premier modèle de reconnaissance visuelle des objets résidait dans sa proposition computationnelle d'ensemble car elle s'accompagnait de suggestions algorithmiques spécifiant la nature des traitements dont certaines ont été simulées sur ordinateur. Néanmoins, le passage de la représentation 2D½ à la représentation 3D et la représentation 3D ne sont pas très bien spécifiées et n'ont donc pas été décrites au niveau algorithmique.

Le modèle de Biedermann (1987)

Ce modèle computationnel de reconnaissance d'objets par les composantes (nommé « Recognition By Components » en anglais) postule l'existence de composantes volumétriques (ci-après dénommés géons) communes à tous les objets. Vingt-quatre géons seraient suffisant pour décrire tous les objets existants. Ils sont déterminés par quatre formes principales (cône, cylindre, cube, coin), par les variations métriques de chacune de ces formes et par le croisement de quatre dimensions spatiales qualitatives (l'axe du géon, la section des contours, la symétrie de la forme ou encore les modifications de taille de la forme). Les relations spatiales entre les géons ne sont donc pas codées en termes métriques mais en termes de relations catégorielles telles que « au-dessus », « en-dessous » ou encore « à côté de ». Chaque objet peut donc être décomposé en parties invariables et possède une description structurale unique des géons, aucun autre objet ne partageant la même structure. De ce fait, il n'est pas nécessaire de les extraire tous mais seulement certains d'entre eux pour reconnaître un objet car il existe une forte probabilité que les géons extraits et leur arrangement spatial spécifique ne soient présents que dans un seul objet.

L'identification des objets se produit quand la nature et l'organisation spatiale des géons mises en évidence peuvent être appariées aux modèles structuraux en 3D des objets stockés en mémoire à long terme. Chaque objet est donc représenté en mémoire à long terme par un modèle structural qui explicite à la fois son axe principal, ses composantes, leurs tailles relatives, leurs orientations et leurs articulations. L'identification des objets n'est donc pas affectée par des modifications de leur orientation, de leur taille ou de leur position spatiale car les propriétés structurales se conservent pendant le passage de la description en deux dimensions à la modélisation en trois dimensions, elles sont donc indépendantes du point de vue. Ces propriétés

d'invariance spatiale garantissent que pour un objet donné, quelque soit le point de vue, la même description structurale de géons est activée et que leur arrangement spatial n'est pas modifié.

Les apports de ce modèle sont l'implémentation sur ordinateur, tout comme le modèle de Marr et Nishihara (1978), et les différents arguments expérimentaux généraux. Ces arguments comprennent l'invariance spatiale, la rapidité et la résistance au bruit de la reconnaissance et enfin l'importance des différentes composantes volumétriques dans la reconnaissance visuelle des objets. Néanmoins, comme le modèle de Marr et Nishihara (1978), ce modèle n'a qu'une portée limitée. Il ne permet la reconnaissance que des catégories de base des objets à partir des configurations spécifiques de leurs constituants (par exemple : distinguer une vache d'un cheval) mais n'explique pas comment l'humain parvient à des distinctions beaucoup plus subtiles entre différents exemplaires d'une même catégorie d'objets partageant des configurations similaires (par exemple : distinguer deux chevaux). En effet, l'extraction des composantes volumétriques est basée uniquement sur des indices structuraux en 2 dimensions (les jonctions et les contours) et ne prend pas en considération les indices de texture, de mouvement et d'ombre, indices nécessaires à la détection des volumes pour les objets naturels (vivants) (Biederman, 1987; Boucart, Marendaz, Rousset, & Charnallet, 2003; Peterson, 2004).

Le modèle de référence d'Humphreys et Riddoch

D'un point de vue historique, Lissauer (1890, cité par Humphreys & Riddoch, 1987a) a scindé la reconnaissance visuelle des objets en deux niveaux de traitements spécifiques, les traitements perceptifs et les traitements associatifs. Les premiers peuvent être définis comme le traitement des propriétés visuelles de l'objet dans le but de construire une représentation de sa forme. Les seconds peuvent être définis comme l'accès à la signification des images dans le but de dénommer cet objet. Cet accès provient de l'association des représentations visuelles prototypiques élaborées lors des étapes du traitement perceptif, avec les connaissances structurales et sémantiques stockées en mémoire à long terme au cours des rencontres antérieures avec cet objet. Le modèle d'Humphreys et Riddoch (1987b), tout comme les modèles de Marr et Nishihara (1978) et de Biedermann (1987), suppose donc que l'accès à la signification

d'un objet se fait par l'activation d'une représentation abstraite, stockée en mémoire sémantique, grâce à l'appariement avec le percept construit. Ce modèle hiérarchique a été le premier modèle de reconnaissance visuelle des objets basé sur la neuropsychologie cognitive et a donc été élaboré sur base d'une longue série d'études de cas avec des adultes cérébro-lésés présentant différents types de troubles de reconnaissance des objets depuis les années 1970.

Etudes de cas

Warrington et Taylor (1978) ont mis en évidence que les processus impliqués dans le traitement visuel des objets peuvent être scindés en fonction de la localisation de la lésion cérébrale. La description épisodique et abstraite de l'objet (constance d'objets) est altérée chez les patients avec lésion de l'hémisphère droit mais est préservée chez les patients avec lésion de l'hémisphère gauche. A l'inverse, l'accès aux connaissances sémantiques est intact chez les patients avec lésion droite mais déficitaire chez les patients avec lésion gauche. L'étude de ces patients avec lésion latéralisée a donc permis la mise en évidence d'une dissociation claire entre les processus perceptifs permettant la construction d'un percept et les processus associatifs permettant l'appariement de celui-ci avec les connaissances stockées en mémoire.

Au sein des processus perceptifs, différentes études sur le traitement des caractéristiques ont mis en évidence que les différentes dimensions de l'objet sont codées indépendamment l'une de l'autre et donc traitées distinctement. L'analyse de la luminosité peut être altérée alors que celle de la couleur se réalise normalement (Heywood, Wilson, & Cowey, 1987). Le codage de la couleur peut être altéré alors que celui du mouvement se réalise sans difficulté (Humphreys & Riddoch, 1987a). Enfin, l'analyse de la texture peut être altérée alors que celle de la forme se déroule normalement (Battelli, Casco, & Sartori, 1997).

La combinaison de ces caractéristiques en un percept cohérent peut également être altérée spécifiquement ou en association avec d'autres déficits, notamment en cas de syndrome de Balint (Friedman-Hill, Robertson, Treisman, & others, 1995) ou de lésions des régions pariétales (Ward, Danziger, Owen, & Rafal, 2002). Dans le premier cas, les caractéristiques de plusieurs objets vont être combinées de manière inappropriée comme s'il s'agissait d'un seul et même objet, alors que dans le second cas, les caractéristiques d'un même objet ne sont pas assignées aux dimensions appropriées.

Toujours au sein des processus perceptifs, Humphreys et Riddoch (1987a) ont mis en évidence avec leur patient HJA atteint d'agnosie intégrative, la présence d'une dissociation entre la combinaison de ces caractéristiques basiques de la forme (préservée en cas d'agnosie intégrative) et le groupement perceptif des différentes parties en un tout cohérent (altéré en cas d'agnosie intégrative). Behrmann & Kimchi (2003) ont confirmé l'existence de cette dissociation qui distingue d'une part les traitements des caractéristiques et d'autre part les processus intégratifs au sein du traitement de l'objet. Au sein des processus intégratifs, Shalev & Humphreys (2002) et Riddoch & Humphreys (2004) ont révélé la présence d'une dissociation au sein du traitement global-local chez les patients atteints d'agnosie intégrative, le traitement local est altéré alors que le traitement global est préservé.

La construction d'une représentation de l'objet indépendante du point de vue, dernier niveau de traitement au sein des processus perceptifs, peut être altérée de différentes manières en fonction du type et de la localisation de la lésion cérébrale. L'appariement d'objets présentés sous différents points de vue peut être altéré quand l'axe principal de l'objet est modifié (raccourci ou déformé) ou à l'inverse cet appariement peut être altéré quand les caractéristiques prototypiques de l'objet sont masquées (Humphreys & Riddoch, 2006).

D'autres études menées également avec des patients atteints d'agnosie intégrative (Butter & Trobe, 1994; De Renzi & Lucchelli, 1993; Humphreys & Riddoch, 1987a) ont mis en évidence l'altération de la discrimination figure-fond et du groupement perceptif et la préservation de l'accès aux connaissances stockées en mémoire à long terme (représentations structurales et sémantiques), cette dissociation permet à nouveau de distinguer les processus perceptifs et associatifs.

Au sein des processus associatifs, de nombreux auteurs (Fery & Morais, 2003; Hillis & Caramazza, 1995; Humphreys, Price, & Riddoch, 1999; Humphreys & Riddoch, 1987a; Sheridan & Humphreys, 1993; Stewart, Parkin, & Hunkin, 1992) ont mis en évidence un déficit d'accès aux connaissances sémantiques par la modalité visuelle alors que cet accès est préservé en modalité auditivo-verbale.

De plus, même si l'accès aux connaissances sémantiques est altéré, l'accès aux connaissances structurales (caractéristiques physiques) est préservé, ce qui signifie que l'accès aux connaissances stockées en mémoire à long terme est divisé en deux systèmes distincts et indépendants.

La figure 1 représente donc le **modèle de Humphreys et Riddoch** sur base de ces différentes études de cas qui ont mis en évidence des dissociations entre les traitements des caractéristiques et les traitements de l'objet mais également entre les différents processus composant chaque niveau de traitement.

Hierarchisation des traitements visuo-perceptifs

Ce modèle hiérarchique consiste en une succession de plusieurs niveaux de traitement. Le monde visuel est tout d'abord décomposé en caractéristiques visuelles distinctes qui vont être combinées par la suite en un percept cohérent de l'objet. Humphreys et Riddoch (2006) distinguent le traitement des caractéristiques incluant le codage puis la combinaison de ces caractéristiques et le traitement de l'objet menant à une représentation complète de l'objet. Ce traitement de l'objet comprend les *processus intégratifs* permettant la création d'une représentation de l'objet dépendante du point de vue, les *processus de transformation* permettant la création d'une représentation de l'objet indépendante du point de vue et l'accès aux connaissances stockées en mémoire à long terme.

Au sein du **traitement des caractéristiques**, le codage de ces caractéristiques comprend la détection et l'analyse des différentes dimensions des objets dont la forme, la couleur, le mouvement, la profondeur, ou encore la texture. Concernant plus spécifiquement la forme, le traitement des traits géométriques locaux permettent de déterminer les caractéristiques physiques de ces formes (longueur, taille, orientation,...) et l'existence de bords, de courbes et de contours rectilignes de l'objet.

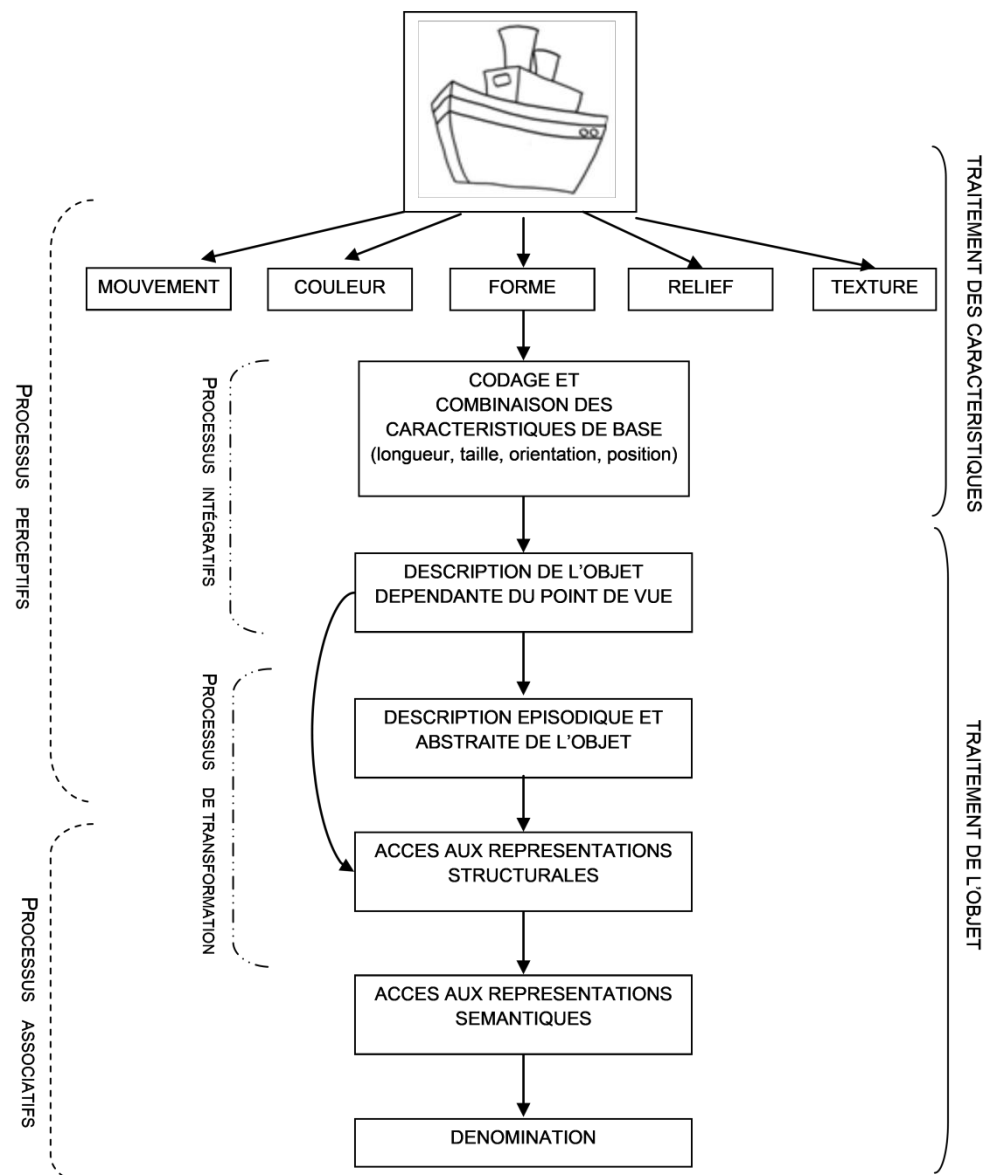


Figure 1. Modèle de reconnaissance visuelle de Humphreys & Riddoch (1987,2006)

Ce niveau correspond au « primal sketch » de Marr et Nishihara (1978). La combinaison des différentes dimensions et des traits locaux va ensuite permettre de générer la perception d'un monde visuel cohérent grâce à différents processus s'influençant mutuellement. Ces processus sont la synchronisation temporelle (les caractéristiques vont ensemble car elles sont présentes en même temps), l'attention spatiale (les caractéristiques vont ensemble car elles sont présentes au même endroit), et le processus de co-localisation (les caractéristiques des différentes dimensions sont encodées dans une représentation spatiale commune).

Au sein du **traitement de l'objet**, les *processus intégratifs* permettent l'élaboration d'une description de l'objet dépendante du point de vue ou centrée sur l'observateur. A ce niveau, correspondant à la représentation en 2D ½ de Marr et Nishihara (1978), la profondeur et l'orientation des surfaces locales de l'objet sont représentées en termes de distances locales de chaque point par rapport à l'observateur. Ces processus intégratifs permettent donc le codage des relations entre les traits détectés au sein du traitement des caractéristiques, la coordination des éléments locaux et des éléments de la forme globale en un « tout perceptif structuré ». Ils comprennent trois processus distincts, la discrimination figure-fond, le groupement perceptif et le traitement local-global. La discrimination figure-fond est définie comme la perception des différentes parties qui composent un objet comme appartenant au même ensemble tout en ignorant les éléments appartenant à d'autres objets.

Le groupement perceptif est fondé sur les relations de continuité, de colinéarité et de clôture définis par la théorie Gestalt. Il permet le regroupement et l'intégration des caractéristiques perceptives élémentaires afin de créer des formes identifiables et cohérentes. Le traitement global-local mène à la formation de représentations globales et de représentations basées sur les détails et permet de coder indépendamment les caractéristiques globales et locales des objets.

Les *processus de transformation* permettent la construction d'une représentation de l'objet invariante, tridimensionnelle et indépendante du point de vue de l'observateur. Ce niveau, correspondant à la représentation de l'objet en 3D de Marr et Nishihara (1978), aboutit à la description épisodique et abstraite de l'objet et donc à la constance d'objets. Humphreys et Riddoch (2006) considèrent ce niveau d'analyse comme une étape optionnelle, non obligatoire dans l'identification courante des objets, qui n'est

réalisée que quand la situation l'exige, dans le cas d'une représentation non conventionnelle de l'objet impliquant la modification de son axe principal ou l'absence des caractéristiques prototypiques.

Enfin, l'*accès aux connaissances stockées* en mémoire à long terme est le dernier processus inclus dans le traitement de l'objet et est divisé en deux niveaux de représentations. En premier lieu, le produit du traitement perceptif doit être apparié à une représentation structurale qui spécifie les caractéristiques physiques perceptives de l'objet (connaissances stockées de la forme), grâce à l'activation de la représentation qui lui correspond (sentiment de familiarité, impression de déjà vu). En deuxième lieu, le percept doit être apparié à une représentation sémantique comprenant toutes les caractéristiques composant le sens de l'objet (fonction, catégorie, contexte). En dernier lieu, l'accès à la description phonologique de l'objet en mémoire à long terme permet sa dénomination.

Néanmoins, au sein des processus pré-sémantiques, l'accès aux représentations structurales est associé aux traitements associatifs, car même si la description de l'objet indépendante du point de vue (la constance d'objet) est d'abord influencée par les caractéristiques perceptives du stimulus, les connaissances stockées de la forme (caractéristiques physiques connues) jouent un rôle dans le traitement des objets vus sous différentes perspectives. La reconnaissance des objets indépendamment du point de vue de l'observateur est basée sur les représentations épisodiques de la forme qui sont abstraites des différents points de vue à chaque fois que l'objet est vu et qui sont stockées en mémoire.

Cependant, les représentations structurales soutiennent l'abstraction des représentations épisodiques, d'autant plus que l'objet est perçu dans une orientation éloignée de sa présentation prototypique. Plus un objet est présenté de manière ambiguë, plus l'accès aux représentations structurales est nécessaire pour la réalisation de la constance d'objets (Humphreys & Riddoch, 1987b; Riddoch et al., 2008).

Le modèle de Humphreys et Riddoch (1987; 2006) demeure la conceptualisation la plus utilisée et celle qui donne la description la plus complète de la reconnaissance visuelle des objets à l'heure actuelle. Néanmoins, ce modèle, rivé sur les processus de reconnaissance, ne laisse qu'une place très limitée aux processus visuo-spatiaux. Au

sein des traitements perceptifs précoces, ce modèle aborde la discrimination des composantes élémentaires de localisation et d'orientation mais à aucun moment n'aborde ni n'explique la manière dont les individus traitent la position des éléments (objets) dans l'espace, ni leur disposition les uns par rapport aux autres et par rapport à l'individu. En outre, la façon dont s'articulent les traitements visuo-perceptifs avec les traitements visuo-moteurs et visuo-constructifs n'est pas spécifiée. Pourtant, ces traitements moteurs et visuo-constructifs sont largement dépendants de la capacité de l'individu à percevoir les informations visuelles telles que les propriétés de taille, de forme et de dimension des objets (Chaix & Albaret, 2014).

LES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS CHEZ L'ENFANT

Les représentations chez l'enfant

Les modèles adultes de reconnaissance visuelle des objets ne sont pas directement applicables aux enfants car les enfants et les adultes diffèrent largement sur le plan clinique. Il est donc important de développer des modèles cognitifs spécifiques aux enfants. En effet, les lésions et les troubles étant acquis chez l'adulte, une différence significative est donc observable dans la phase post-lésionnelle par rapport au fonctionnement antérieur typique. Alors que chez l'enfant avec lésion congénitale ou trouble neuro-développemental, celui-ci n'a jamais fonctionné normalement. Il ne saurait donc pas se plaindre de difficultés ou de particularités car il n'a connu que ce type de fonctionnement depuis sa naissance. De plus, le tableau clinique chez l'enfant est plus complexe en raison de l'existence de nombreuses intrications : le moment, la localisation et l'étendue exactes de la lésion, les phénomènes de plasticité et d'adaptation cérébrales propres à chaque enfant, la présence de troubles intellectuels et cognitifs associés, les stimulations de l'environnement familial et éducatif, et enfin les acquisitions en cours au niveau cognitif et scolaire (Chokron & Demonet, 2010; Mazeau & Pouhet, 2014).

Plusieurs auteurs ont donc tenté au cours de la dernière décennie de modéliser les processus visuo-perceptifs chez les enfants (Chaix & Albaret, 2014; Chokron, Demonet, et al., 2010; Mazeau & Pouhet, 2014; Zuidhoeck, 2015). Néanmoins, ces auteurs utilisent une terminologie très différente et n'incluent pas tous les mêmes niveaux de traitement au sein de ces processus visuo-perceptifs.

Chokron (2010) distingue quatre étapes au sein de la cognition visuelle, partant de la sélection des informations visuelles à l'adéquation des gestes grâce à la vision. Elle intègre la cognition visuelle au sein des processus neurovisuels qui incluent également l'intégrité des champs visuels et l'oculomotricité. En premier lieu, *la détection, l'exploration et l'attention visuelles* représentent un pré-requis nécessaire aux traitements visuels ultérieurs car elles permettent le déplacement attentionnel dans l'environnement, la sélection des informations pertinentes et la fixation de l'attention sur ces informations afin de réaliser une analyse visuelle fine (Dutton, 2015). En second lieu, *l'organisation et la représentation de l'espace* permettent une reconstruction fidèle de la position des éléments les uns par rapport aux autres. Elles constituent une étape intermédiaire qui influence les processus d'identification et de réalisation des actes moteurs. En troisième lieu, *la reconnaissance visuelle* permettant l'identification du stimulus comprend les processus de catégorisation perceptive et sémantique, tels que définis dans la conception d'Humphreys et Riddoch (1987b). Enfin, *la coordination visuo-motrice* permet à l'individu d'ajuster son action à ce qu'il voit et perçoit en fonction des modifications continues de l'environnement (Dutton, 2015).

Cette conceptualisation (Chokron, 2015; Chokron et al., 2010) propose donc une première articulation des traitements visuo-perceptifs, visuo-spatiaux et visuo-moteurs. Elle reflète clairement la distinction, largement reconnue dans la littérature, entre les traitements visuo-spatiaux (localisation des points dans l'espace, orientation topographique, analyse des directions et des distances), dépendant de la voie dorsale (occipito-pariétale) et les processus de reconnaissance, pris en charge par la voie ventrale (occipito-temporale). Toutefois, les processus moteurs se limitent à la coordination visuo-motrice.

À cet égard, Chaix et Albaret (2014) proposent une modélisation dissociant les processus purement perceptifs des traitements ayant une implication motrice. Les processus perceptifs englobent les traitements visuo-perceptifs et les traitements visuo-spatiaux. Les traitements moteurs comprennent les traitements visuo-moteurs, c'est-à-dire les activités motrices qui reposent sur des rétroactions visuelles et les traitements visuo-constructifs par lesquels les éléments visuels sont intégrés en un tout cohérent au travers d'une réponse motrice. Dutton (2015) parle quant à lui de *guidance visuelle du mouvement* pour désigner les processus qui ajustent les mouvements du corps (membres inférieurs et supérieurs) aux informations en provenance des voies visuelles.

Les processus neurovisuels tels que définis par Chokron (2010) sont évidemment influencés par une série de facteurs généraux non spécifiques qui affectent les capacités attentionnelles déployées. Ces influences ont été prises en compte dans le **modèle hiérarchique de la perception visuelle et du comportement** de Zuidhoek (2015). Ce modèle met l'accent sur l'impact de l'environnement et des facteurs psychologiques intrinsèques sur la mise en œuvre des processus attentionnels généraux. Les caractéristiques de l'environnement direct telles que la présence de distracteurs auditifs (bruits dans une autre pièce ou dans la rue, voix des parents) ou la présence de distracteurs visuels (configuration de la pièce, présence de jouets ou de dessins), considérées comme des facteurs extrinsèques, ont un impact important sur les capacités attentionnelles que l'enfant mobilise (Fisher, Godwin, & Seltman, 2014). Les facteurs psychologiques intrinsèques de l'enfant ont également une influence prépondérante sur les processus exécutifs et attentionnels mis en œuvre. Les expériences antérieures de l'enfant avec une situation particulière vont avoir des répercussions significatives, positives ou négatives, sur les facteurs motivationnels et émotionnels. Même si ces facteurs peuvent également être influencés par des causes extérieures telles que la promesse d'une récompense ou d'une punition ou des événements indépendants de la situation actuelle. De plus, les besoins actuels de l'enfant tels que la faim, la soif, ou le besoin d'être réconforté par ses parents risquent également d'avoir un impact important sur les processus attentionnels mobilisés. Les processus attentionnels généraux ont donc pour objectif d'opérer la sélection des informations pertinentes entre les différentes modalités sensorielles sous le contrôle exécutif qui sélectionne la modalité sensorielle d'intérêt et inhibe les informations non pertinentes en fonction des buts actuels. Ces processus attentionnels généraux se répercutent à leur tour sur les processus attentionnels spécifiques à la modalité visuelle et sur les traitements visuels qui en découlent.

Au sein de la cognition visuelle, les étapes d'analyse et d'intégration des informations visuelles supposent, en effet, des capacités d'attention et d'exploration visuelles qui permettent de focaliser son attention sur des éléments spécifiques d'une scène visuelle en fonction des objectifs poursuivis (Lueck, 2015). Dans le modèle hiérarchique, les capacités attentionnelles spécifiques à la modalité visuelle reposent elles-mêmes sur des facteurs exogènes et endogènes qui vont tous deux déterminer ce qui est perçu en influençant la localisation et la taille du périmètre attentionnel. Les facteurs exogènes

correspondent à un système attentionnel bottom-up guidé par les stimuli visuels et basé sur la sélection et la modulation des informations sensorielles telles que la taille et le type d'objet ou de scène visuelle (mots, images, visages, environnement complexe). Alors que les facteurs endogènes correspondent à un système attentionnel top-down guidé par les buts et les attentes de la personne et basé sur la sélection et la modulation des informations générées en interne telles que le contenu de la mémoire de travail ou la mémoire à long terme (par exemple, l'enfant va réaliser une analyse visuelle complètement différente en fonction de la consigne de l'exercice, dénommer l'image représentée ou trouver un élément spécifique au sein de cette image) (Chun, Golomb, & Turk-Browne, 2011; Zuidhoeck, 2015).

La figure 2 présente un essai d'intégration des différentes conceptions revues jusqu'à présent au sein d'un modèle unifié. Les processus neurovisuels comprennent les fonctions oculomotrices, l'intégrité du champ visuel et les traitements impliqués au sein de la cognition visuelle conformément à Chokron (2010, 2015). Ce modèle positionne les traitements impliqués dans la cognition visuelle et la guidance visuelle des mouvements au sein des fonctions visuelles supérieures (Lueck, 2015). Selon la conception de Zuidhoeck (2015), les processus attentionnels généraux et spécifiques à la modalité visuelle sont représentés en amont des processus perceptifs composés des deux voies de traitement, la voie ventrale de reconnaissance des objets (aussi appelée la voie du *Quoi*) et la voie dorsale de traitement des informations spatiales (aussi appelée la voie du *Où*).

Ces traitements qui font partie intégrante de la cognition visuelle forment les étapes préalables nécessaires à la guidance visuelle du mouvement (aussi nommée la voie du *Comment*) (Zuidhoeck, 2015). Au sein des traitements perceptifs, la reconnaissance des objets est divisée en processus perceptifs et processus associatifs, chacun étant à son tour subdivisé en plusieurs niveaux d'analyse, similaires à ceux présentés au sein du modèle d'Humphreys et Riddoch (1987b, 2006).

Ce cadre de référence sera utilisé tout au long de ce travail de thèse, de la création de la batterie de tests à l'analyse des différents niveaux de traitement visuo-perceptif.

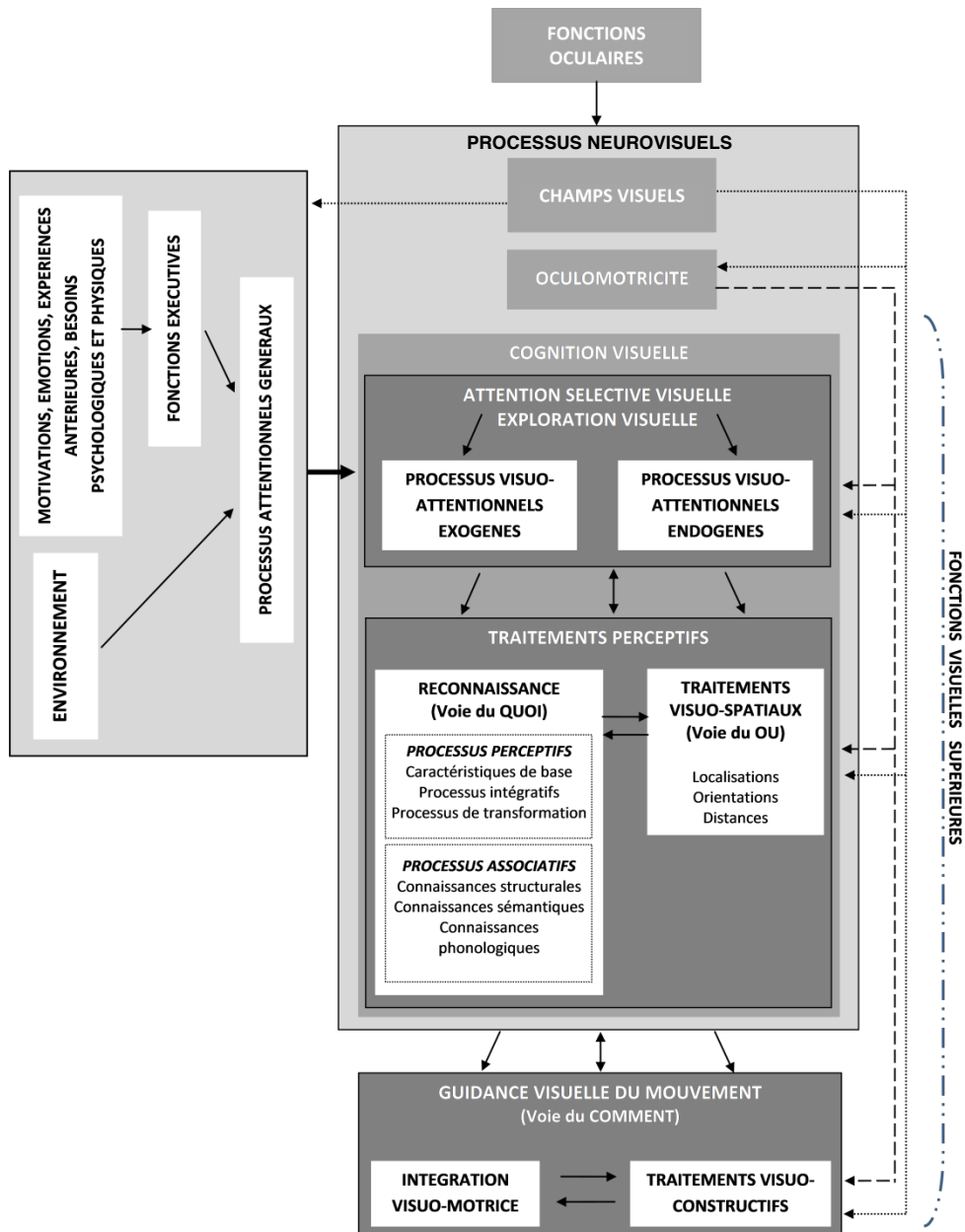


Figure 2. Représentation des processus neurovisuels chez l'enfant

CHAPITRE 2

LA PARALYSIE CÉRÉBRALE

L'objectif de ce chapitre est de présenter la paralysie cérébrale en partant de sa définition et de sa classification en termes de troubles moteurs, de capacités fonctionnelles, de lésions cérébrales et d'étiologies. Nous aborderons ensuite les différents troubles médicaux, perceptifs et cognitifs associés aux troubles moteurs dans la paralysie cérébrale. Enfin, nous décrirons plus précisément les troubles cognitifs et neuro-ophtalmologiques fréquemment mis en évidence dans cette pathologie.

DÉFINITIONS

La paralysie cérébrale est une pathologie neuro-développementale définie pour la première fois en 1861 par Little. En 1952, Tardieu a utilisé pour la première fois le terme « infirmité motrice cérébrale » (IMC) pour regrouper les enfants présentant une atteinte motrice lourde mais un maintien des capacités mentales et de communication, dans un contexte de lésions cérébrales néo- ou péri-natales. Quelques années plus tard, le terme « infirmité motrice d'origine cérébrale » (IMOC) a été introduit pour regrouper les enfants présentant une atteinte motrice associée à des troubles cognitifs et intellectuels empêchant une scolarisation traditionnelle. Néanmoins, à l'heure actuelle, il n'y a plus de séparation claire entre IMC et IMOC sur base du critère de la

préservation des compétences intellectuelles en raison des multiples troubles cognitifs qui peuvent être associés aux troubles moteurs primaires (Bérard, 2008). Le terme « polyhandicap » regroupe, quant à lui, les enfants présentant une atteinte motrice, une déficience intellectuelle modérée à profonde et différents troubles associés entraînant une restriction extrême de l'autonomie et des possibilités de perception, d'expression et de relations (Bérard, 2008). La paralysie cérébrale est donc un terme générique qui englobe ces trois types d'atteinte, l'infirmité motrice cérébrale, l'infirmité motrice d'origine cérébrale et le polyhandicap.

Cette pathologie a une prévalence de 1 à 3/1000 naissances vivantes. Malgré les progrès de la médecine, de la compréhension des étiologies et de la prévention et une surveillance plus stricte des grossesses ces dernières décennies, cette prévalence ne diminue pas. La persistance et l'émergence de nouvelles conditions défavorables telles que l'augmentation du taux de survie des enfants grands prématurés et de petits poids de naissance grâce aux progrès médicaux en obstétrique et néonatalogie, l'augmentation progressive de l'âge maternel et du nombre de grossesses multiples (augmentation des procréations médicalement assistées) pourraient expliquer la stabilité de cette prévalence. En effet, 1% des enfants nés entre 32 et 36 semaines d'âge gestationnel (AG), 9% des enfants nés avant 33 semaines AG et 10% des enfants nés avant 28 semaines AG souffrent de paralysie cérébrale (Ancel, 2004; Cans, 2005; Croteau, Loranger, & Laporte, 2002; Larroque et al., 2008; O'Shea, 2008; Tsutsui, Nagahama, & Mizutani, 1999; Wu, Croen, Shah, Newman, & Najjar, 2006).

La paralysie cérébrale est, depuis 2007 (Rosenbaum et al., 2007), définie par des troubles permanents du mouvement et de la posture résultant de lésions non progressives du cerveau en développement du fœtus ou du jeune enfant. Cette pathologie est non progressive dans le sens où la lésion ou la malformation sont non évolutives.

Néanmoins, le pattern des manifestations cliniques change avec l'âge en raison des multiples impacts de la pathologie sur les trajectoires développementales dans les domaines de la motricité, de la cognition, de l'efficacité intellectuelle, de la psychologie et de la sociabilité (Morris, 2007; Rosenbaum et al., 2007; Straub & Obrzut, 2009). Par contre, la définition actuelle de la Paralysie Cérébrale ne détermine pas clairement la limite d'âge supérieure à laquelle la lésion cérébrale peut survenir, bien que l'usage

place cette limite à l'âge de deux ans. Elle ne détermine pas non plus le degré de sévérité minimum de l'atteinte motrice requis pour le diagnostic ni les syndromes et les encéphalopathies qui doivent être exclus de la PC (Morris, 2007).

Par ailleurs, parallèlement aux troubles du mouvement et de la posture, cette définition intègre l'existence d'un grand nombre de troubles associés (épilepsie, intellectuel, cognitif, médical, sensoriel, perceptif,...) de divers degrés de sévérité, allant de l'absence totale de trouble jusqu'à une atteinte sévère.

Les enfants avec PC forment donc un groupe extrêmement hétérogène à tout point de vue, tant au niveau des atteintes motrices et cognitives, que de l'étiologie ou de la présence et de la sévérité des troubles associés (Arents, Cans, & Marchal, 2013; Rosenbaum et al., 2007; Straub & Obrzut, 2009). Ces enfants vont donc présenter des profils très variés de compétences et de déficits qu'il est indispensable de prendre en considération afin d'adapter au mieux les activités de la vie quotidienne, les apprentissages et les différentes prises en charge en fonction de leurs possibilités.

CLASSIFICATION

En raison de cette hétérogénéité considérable et dans le but d'optimiser le diagnostic et les prises en charge proposées aux enfants avec PC, sur base d'un profil clair et détaillé, Rosenbaum et al. (2007) ont proposé une classification de la paralysie cérébrale en quatre points principaux, (1) les troubles moteurs et leur distribution anatomique, (2) l'imagerie cérébrale, (3) l'étiologie et le moment présumé de la lésion, et enfin (4) les troubles associés.

Troubles moteurs

Nature et type de troubles

Les enfants avec PC sont habituellement classés en fonction du type de troubles du mouvement et de tonus musculaire qui prédomine le tableau clinique, la forme spastique, la forme dyskinétique et la forme ataxique. Néanmoins, un grand nombre d'enfants, groupés sous la typologie forme mixte, présentent un tableau clinique au sein duquel aucune forme ne prédomine (Kozais et al., 2007; O'Shea, 2008; Rosenbaum et al., 2007; Straub & Obrzut, 2009).

La spasticité, présente dans 75 à 85% des cas, est définie par l'augmentation des contractions musculaires perturbant les mouvements et les postures et par la modification des propriétés visco-élastiques du muscle en le rendant moins extensible, provoquant à long terme des raccourcissements des muscles et des tendons et des contractures articulaires. Ce déséquilibre musculaire chronique va donc entraîner dans la majorité des cas des complications orthopédiques pendant la croissance de l'enfant (Arents et al., 2013; Bérard, 2008; O'Shea, 2008; Wu et al., 2006).

La dyskinésie, présente dans 10 à 15% des cas, est divisée en deux formes, la dystonie et la choréo-athétose. La dystonie, causée par une atteinte des noyaux gris centraux, est définie par la présence de mouvements et de postures involontaires anormaux tels que des rotations, des flexions ou encore des extensions des différentes parties du corps consécutives à des contractions musculaires soutenues (augmentation du tonus musculaire). La choréo-athétose est causée par une atteinte de la substance grise centrale en lien avec la souffrance prolongée du nouveau-né à terme et est définie par la présence de chorée (mouvements involontaires, rapides et saccadés) et d'athétose (mouvements lents et constants). Ces mouvements involontaires, dont l'intensité varie avec le stress et les exigences motrices de la situation, parasitent la réalisation des mouvements volontaires mais disparaissent complètement pendant le sommeil. Ils sont fréquemment associés à des atteintes de la sphère bucco-faciale provoquant des troubles de la parole (dysarthrie), des troubles de l'alimentation et des troubles de la déglutition (Arents et al., 2013; O'Shea, 2008; Straub & Obrzut, 2009; Wu et al., 2006).

L'ataxie, présente dans seulement 5% des cas, est causée par une atteinte cérébelleuse et définie comme une perte de la coordination musculaire provoquant des problèmes de marche, de motricité fine et d'équilibre en association avec une faiblesse du tonus musculaire et des tremblements. Les enfants avec ataxie présentent des mouvements dont la force, le rythme et la précision sont déficitaires (Arents et al., 2013; Bérard, 2008; O'Shea, 2008; Wu et al., 2006).

La forme mixte est définie comme l'association, chez un même enfant, de plusieurs types d'atteinte motrice, le plus souvent de la spasticité avec des éléments dystoniques. Il est donc important d'identifier les signes neurologiques prédominants mais également de préciser chacun des troubles du mouvement et du tonus présents chez ces enfants (Arents et al., 2013; Bérard, 2008; Pueyo, Junqué, Vendrell, Narberhaus, & Segarra, 2009; Wu et al., 2006).

Distribution anatomique

La diplégie est caractérisée par l'atteinte motrice d'intensité variable de la partie inférieure du corps et des jambes. Elle est consécutive à une naissance prématurée et à des lésions de leucomalacie périventriculaire dans la grande majorité des cas. La déambulation autonome apparaît vers l'âge de trois ans pour les formes de sévérité moyenne. La marche autonome sans difficulté spécifique est présente chez 16% des enfants avec diplégie, la marche autonome avec difficulté est présente chez 38% d'entre eux, alors que dans un tiers des cas les enfants se déplacent en chaise roulante (Himmelmann, Beckung, Hagberg, & Uvebrant, 2006). Leur démarche typique en ciseaux associe des membres inférieurs en adduction, une rotation interne des cuisses, une flexion des genoux et des hanches et un équin des pieds. Cette démarche provoque régulièrement des complications articulaires au niveau des hanches. Les membres supérieurs peuvent présenter de légers tremblements, une certaine maladresse et/ou des déficits de motricité fine. Sur le plan cognitif, des troubles visuo-perceptifs, visuo-spatiaux, visuo-moteurs, visuo-constructifs, des troubles de l'attention visuelle et des troubles praxiques sont fréquemment mis en évidence (Thuilleux, 2008; Truscelli, 2008).

L'hémiplégie est caractérisée par l'atteinte motrice d'intensité variable d'un hémicorps, gauche ou droite, consécutive à des lésions cortico sous-corticales focales sans notion de grossesse ou accouchement problématique dans la majorité des cas. Le diagnostic est évoqué lors de l'acquisition de la marche autonome dans les âges habituels ou au plus tard vers 2 ans car le pied du côté plégie se positionne en équin ou lors de l'observation d'une asymétrie dans la manipulation. L'atteinte motrice prédomine fréquemment au membre supérieur qui présente une attitude en flexion du coude et du poignet, une pronation de la main et des difficultés à prendre les objets grâce à la pince

pouce-doigt. Seulement un tiers des enfants avec hémiplégie peuvent utiliser leur main plégée comme une aide valide pour les différentes activités de la vie quotidienne. Un autre tiers des enfants utilise de manière plus grossière leur membre supérieur plégé et le dernier tiers des enfants ne prend pas en considération leur membre plégé (négligence). La marche autonome sans difficulté spécifique est présente chez 66% des enfants avec hémiplégie et la marche autonome avec difficultés est présente chez 29% d'entre eux (Himmelman et al., 2006). L'hémiplégie est régulièrement associée à une épilepsie lésionnelle comprenant des crises généralisées dans 18% des cas et des crises partielles dans 73% des cas, d'apparition précoce (dans la période néonatale) ou plus tardive (dans l'enfance ou après la puberté). Si cette épilepsie débute avant l'âge d'un an, elle persistera à long terme chez 47% des enfants. Sur le plan cognitif, des troubles visuo-spatiaux et des troubles spécifiques du langage sont fréquemment observés, l'astérognosie (incapacité de reconnaître les objets par le toucher) a également été mise en évidence dans certains cas. Enfin, sur le plan neurovisuel, le dépistage d'une hémianopsie controlatérale homonyme doit être réalisé au moindre doute afin de proposer des interventions et des adaptations spécifiques si le diagnostic est confirmé (Thuilleux, 2008; Truscelli, 2008).

La quadriplégie est la forme la plus sévère d'atteinte motrice et est caractérisée par l'atteinte des quatre membres, l'insuffisance posturale du tronc et un faible contrôle de la position et des mouvements de tête, consécutive à une ischémie corticale diffuse chez le nouveau-né à terme dans la majorité des cas. Les enfants avec quadriplégie, en fonction du degré de sévérité, présentent peu de mouvements volontaires. Seule une petite minorité de ces enfants accèdera à la déambulation autonome, avec ou sans aide technique. Ces enfants avec quadriplégie se déplacent en chaise roulante de manière autonome (GMFCS niveau 4) dans moins de 10% des cas alors que 90% d'entre eux se déplacent en chaise roulante poussée par un tiers (GMFCS niveau 5) (Himmelman et al., 2006). Sur le plan cognitif, les enfants présentent fréquemment des troubles de la parole et du langage et une déficience intellectuelle légère à profonde.

Le réseau SCPE (Surveillance of Cerebral Palsy in Europe) propose une classification basée sur la différence entre atteinte motrice unilatérale (comprenant les atteintes d'un ou des deux membres d'un même hémicorps) et atteinte motrice bilatérale (comprenant les atteintes de deux, trois ou quatre membres situés sur les deux hémicorps).

Néanmoins, au-delà de ces classifications, il semble important de décrire le type d'atteinte présent et son degré de sévérité pour chaque membre, le tronc et la tête séparément. En effet, cela permet aux thérapeutes d'avoir une représentation complète et détaillée des troubles moteurs présentés par l'enfant et donc de pouvoir planifier des interventions plus ciblées et de meilleure qualité. En effet, un enfant avec une hémiplégie peut également présenter une atteinte contralatérale minime, et un enfant avec une diplégie peut également présenter des troubles de la motricité fine et une certaine maladresse aux membres supérieurs.

Capacités fonctionnelles

Il est important d'évaluer les conséquences fonctionnelles de la paralysie cérébrale dans les différents domaines touchés afin de cibler précisément les capacités de l'enfant et donc lui proposer des interventions thérapeutiques et des adaptations compatibles avec son niveau de fonctionnement et en cas de doute, pouvoir orienter l'enfant vers le professionnel adéquat pour la mise en évidence ou le diagnostic d'un trouble associé spécifique. Différentes échelles de classification sur base d'observations objectives ont été créées et validées depuis fin des années 90, toutes basées sur cinq niveaux de fonctionnement, le niveau 1 correspond à un fonctionnement normal ou presque, le niveau 5 à un fonctionnement très altéré. La GMFCS, détaillée ci-dessous, permet la classification des limitations fonctionnelles, la BFMF (Bimanual Fine Motor Function ; Elvrum et al., 2016) et la MACS (Manual Ability Classification System ; Eliasson et al., 2006) sont deux échelles de classification des habilités manuelles, le SCFCS (Système de classification des fonctions de communication ; Hidecker et al., 2011) permet la classification des capacités d'expression orale et de compréhension de l'enfant, le EDACS (Eating and Drinking Abilities Classification System ; Sellers, Mandy, Pennington, Hankins, & Morris, 2014) permet la classification des capacités de l'enfant avec paralysie cérébrale pour manger

et boire de manière efficace et enfin le VFCS (Visual Function Classification System) est un système de classification spécifique au fonctionnement visuel des enfants (en cours de validation par Baranello, Rosenbaum, Deramore, Denver et Haataja).

La GMFCS (Gross Motor Function Classification System), développée par Palisano et al. (2000), consiste en un système standardisé de classification en cinq niveaux basés sur les restrictions et limitations fonctionnelles, l'appel aux aides techniques à la marche ou à un appareil de mobilité sur roues en fonction de la sévérité des troubles moteurs des enfants avec paralysie cérébrale. La classification est basée sur l'observation directe des performances habituelles des enfants. Elle ne se base pas sur une performance réussie une fois. La première version comprenait quatre groupes d'âge (avant 2 ans, de 2 à 4 ans, de 4 à 6 ans et de 6 à 12 ans) avec des courbes développementales correspondant au niveau de fonctionnement. La GMFCS E-R (Palisano, Rosenbaum, Bartlett, & Livingston, 2007) inclut également les adolescents de 12 à 18 ans. Les niveaux sont différents en fonction des groupes d'âge car l'expression clinique de la motricité globale est dépendante de l'âge, surtout chez le nourrisson et le petit enfant (utilisation de l'âge corrigé jusqu'à deux ans). Par exemple, à l'âge de six ans, le niveau 1 correspond à la marche sans restriction de mouvements, le niveau 2 à la marche avec restriction de mouvements, le niveau 3 à la marche avec aide technique à la marche, le niveau 4 à la mobilité autonome avec restriction de mouvements (aide motorisée) et enfin le niveau 5 correspond au déplacement en fauteuil roulant manuel poussé par un adulte.

Imagerie médicale

Bax et al. (2005) ont mis en évidence que 11,7% des enfants avec PC (tout type confondu) ne montrent pas de lésion cérébrale structurelle à l'IRM. (Krägeloh-Mann & Horber, 2007) mettent en évidence, selon la classification SCPE, une **IRM normale** chez 27% des enfants nés à terme avec une PC bilatérale (contre 42% dans (Numata et al., 2013), 13,6% des enfants nés à terme avec une PC unilatérale, mais seulement chez 4,3% des enfants nés prématurément avec une PC bilatérale et dans aucun cas chez les enfants nés prématurément avec une PC unilatérale. Les enfants nés à terme avec diplégie spastique et IRM normale marchent de manière autonome dans 83%,

présentent une épilepsie dans seulement 8% alors qu'ils présentent un déficit intellectuel dans plus de la moitié des cas (Numata et al., 2013).

Le développement cérébral anormal consiste en une interruption du développement normal du cerveau pendant le développement du fœtus telle qu'une lissencéphalie, une polymicrogyrie, une schizencéphalie ou encore des dysplasies corticales, etc. Ces **malformations**, présentes dans 9,1% des cas de paralysie cérébrale, peuvent être observées dans les différents types de PC (Rosenbaum et al., 2007), le plus fréquemment dans l'ataxie (14%), dans la dyskinésie (9%) et la spasticité (6%) (Garne et al., 2008). Dans 63% des cas, les enfants avec malformation cérébrale se déplacent en chaise roulante (GMFCS niveaux 4 et 5) (Himmelmann & Uvebrant, 2011). (Krägeloh-Mann & Horber, 2007) ont mis en évidence des malformations cérébrales chez 19,7% des enfants nés à terme avec PC bilatérale (contre 3,5% dans (Numata et al., 2013)), 15,9% des enfants nés à terme avec PC unilatérale, 14,3% des enfants nés prématurément avec PC unilatérale, mais seulement chez 1,6% des enfants nés prématurément avec PC bilatérale. (Garne et al., 2008) confirme également la différence significative de prévalence de malformation cérébrale entre les enfants nés à terme (16%) et les enfants nés prématurément (2,5%).

L'**accident vasculaire cérébral** (AVC) consiste en l'interruption de la vascularisation sanguine d'un territoire cérébral causée par l'obstruction ou la rupture d'un vaisseau sanguin, pendant la grossesse ou en période néonatale (Cioni et al., 1999). Rosenbaum et al. (2007) mettent en évidence 7,4% d'AVC focal dans la paralysie cérébrale, provoquant dans 96% des cas une hémiplégie et dans seulement 4% des cas une quadriplégie.

L'**encéphalopathie hypoxo-ischémique** consiste en une nécrose neuronale sélective consécutive à une anoxie ou une hypoxie. Elle provoque une destruction du tissu cérébral dans les zones corticales (par exemple, cortex moteur) et sous-corticales (par exemple : ganglions de la base et thalamus), les plus vulnérables après 34 semaines d'âge gestationnel (Anthonioz et al., 2008; Badawi et al., 2005; Hoon Jr, 2005). Les lésions corticales sont associées à la présence d'épilepsie lésionnelle et de troubles cognitifs alors que les lésions sous-corticales (noyaux gris centraux, thalamus, ganglions de la base) sont associées à des syndromes pyramidaux et des troubles neurovisuels (Cioni et al., 1999). La sévérité de l'encéphalopathie est directement liée

au risque d'avoir une paralysie cérébrale associée. En effet, Badawi et al (2005) ont mis en évidence 9,1% de décès et 13% de paralysie cérébrale chez les enfants nés à terme présentant une encéphalopathie. (Rosenbaum et al., 2007) mettent, quant à eux, en évidence que 9,4% des enfants avec PC présentent des lésions cortico-sous-corticales pouvant se traduire cliniquement par les différents types de paralysie cérébrale à l'exception de l'ataxie. Ils mettent également en évidence que 12,8% des enfants avec PC présentent des lésions des ganglions de la base provoquant dans 75% des cas une dystonie. De telles lésions peuvent également provoquer une quadriplégie ou une diplégie mais pas d'hémiplégie. Dans 67% des cas, les enfants se déplacent en chaise roulante (GMFCS niveaux 4 et 5). Enfin, Krägeloh-Mann & Horber (2007) ont mis en évidence des lésions cortico-sous-corticales chez 41% des enfants nés à terme avec PC unilatérales et 26,2% des enfants nés à terme avec PC bilatérales mais seulement chez 3,8% des enfants nés prématurément avec PC bilatérales et aucun enfant né prématurément avec PC unilatérale.

Les **leucomalacies périventriculaires** (LPV) consistent en un amincissement de la partie postérieure du corps calleux, un élargissement des ventricules latéraux, une irrégularité des parois de ces ventricules et une réduction de la substance blanche périventriculaire. Celles-ci apparaissent majoritairement chez les enfants prématurés entre 28 et 34 semaines d'âge gestationnel, quand la substance blanche est la plus vulnérable (Jacobson, Ygge, & Flodmark, 1998). La substance blanche peut donc être le site d'anomalies importantes qui amènent un dysfonctionnement moteur plus ou moins conséquent. Himmelmann & Uvebrant (2011) ont mis en évidence que 76% des enfants avec LPV marchent de manière autonome (GMFCS niveaux 1 et 2). De plus, si la lésion est étendue, la substance grise attenante peut être lésée, surtout chez les fœtus de plus de 35 semaines d'âge gestationnel (Tsutsui et al., 1999). Les LPV impliquent les faisceaux cortico-spinaux et les radiations optiques distribuées autour des cornes postérieures des ventricules latéraux. Chez les enfants prématurés de très petit poids de naissance, la paralysie cérébrale est causée dans 90% des cas par des LPV, qui constituent également un facteur de risque majeur pour les troubles neurovisuels, définis par une atteinte des champs visuels, des troubles oculo-moteurs et des troubles de la cognition visuelle (Tinelli et al., 2008). Krägeloh-Mann & Horber (2007) ont mis en évidence des LPV chez 89,9% des enfants nés prématurément avec PC bilatérale, 85,7% des enfants nés prématurément avec PC unilatérale alors qu'elles

ne sont présentes que chez 21,3% des enfants nés à terme avec PC bilatérale (contre 14% pour Numata et al., 2013) et 20,4% des enfants nés à terme avec PC unilatérale.

Rosenbaum et al. (2007) regroupent les LPV et les hémorragies intra-ventriculaires sous le terme « lésions de la substance blanche consécutives à l'immaturité cérébrale ». Ils ont mis en évidence ces lésions chez 42,5% des enfants avec PC, plus précisément chez 25% des enfants nés à terme et 75% des enfants nés prématurément (inférieur à 34 semaines AG), chez 71,3% des enfants avec diplégie, 34,2% des enfants avec hémiplégie et 35,1% des enfants avec quadriplégie. Les hémorragies intra-ventriculaires sont réparties en quatre grades selon leurs degrés de sévérité. Les enfants nés prématurément avant 34 semaines AG souffrant d'une hémorragie cérébrale de grade 3 décèdent dans 28% des cas et présentent une paralysie cérébrale dans 7,4% des cas, alors que les enfants souffrant d'une hémorragie intra-ventriculaire de grade 4 décèdent dans 37% des cas et présentent une paralysie cérébrale dans 48,7% des cas (Brouwer et al., 2008).

Étiologie

Sur le plan des étiologies, la paralysie cérébrale est soit qualifiée de congénitale quand la lésion cérébrale apparaît pendant le développement précoce du fœtus, juste avant, pendant ou après l'accouchement dans le premier mois de vie, soit qualifiée d'acquise quand la lésion cérébrale apparaît entre le premier mois de vie et l'âge de deux ans (Straub & Obrzut, 2009; Walstab et al., 2004). Les étiologies de la paralysie cérébrale peuvent également être qualifiées soit d'anténatales (avant la naissance), de néonatales (du moment de la naissance à quelques jours de vie) ou de post-natales (de quelques jours de vie à l'âge de 2 ans). Dans environ un quart des situations, l'étiologie ne peut pas être identifiée, la paralysie cérébrale est donc qualifiée d'idiopathique (Himmelman et al., 2006). Le tableau 1 reprend les différentes étiologies de la paralysie cérébrale.

Tableau 1.
Récapitulatif des étiologies anté-, néo- et post-natales de la paralysie cérébrale

Causes anténatales	Causes néonatales	Causes post-natales
Infections maternelles	Prématurité	Encéphalopathies hypoxo-ischémiques
Intoxications maternelles	Asphyxie/ hypoxie	Encéphalopathies épileptiques
Retard de croissance intra-utérin	Souffrance fœtale aigue	Infections
Malformations cérébrales	Convulsions néonatales	Traumatismes
Accidents vasculaires cérébraux	Hypo- ou hyperthermie	
Traumatismes maternels	Ictère nucléaire non soigné	
Grossesses multiples	Incompatibilité rhésus	
Procréation médicalement assistée		

(Cans, 2005; Rosenbaum et al., 2007)

Troubles associés

Rosenbaum et al. (2007) catégorisent les enfants avec PC en fonction du nombre, du type et de la sévérité des troubles associés qu'ils présentent en plus des troubles moteurs.

Himmelmann et al. (2006) établissent un lien entre l'âge gestationnel et le score au GMFCS et la présence et le nombre de troubles associés. En effet, les enfants nés prématurément avant 28 semaines d'âge gestationnel montrent le plus haut taux de troubles associés, 51% de ces enfants présentent des troubles d'apprentissage et un QI inférieur à 70, 32% une épilepsie et 27% des troubles neurovisuels. Les enfants nés à terme sans incident périnatal notable (anamnèse non contributive) présentent un trouble associé dans 36% des cas et 21% d'entre eux présentent deux troubles associés ou plus. Les enfants nés à terme avec un incident périnatal significatif présentent un trouble associé dans 69% des cas et 41% d'entre eux présentent deux troubles associés ou plus. Les enfants avec PC marchant de manière autonome (GMFCS niveau 1) ne montrent pas de troubles associés dans 79% des cas alors que les enfants dépendant d'une tierce personne pour leurs déplacements (GMFCS niveau 5) montrent deux troubles associés ou plus dans 89% des cas.

En plus des troubles associés présentés dans le tableau 2, les enfants avec PC peuvent présenter les troubles suivants (Arents et al., 2013; O'Shea, 2008; Rosenbaum et al., 2007; Straub & O'Brzut, 2009) :

- différents types de crises et de syndromes épileptiques,
- troubles de la communication (touchant sélectivement ou englobant les capacités de compréhension, d'expression et d'interactions sociales),
- troubles sensoriels (touchant un ou plusieurs organes de sens),
- troubles de la perception (touchant les capacités d'interprétation des informations provenant des différentes modalités sensorielles),
- troubles du comportement (tels que ADHD, troubles du spectre autistique, troubles de l'humeur ou encore troubles anxieux),
- troubles des apprentissages nécessitant régulièrement une adaptation de la scolarité de l'enfant (troubles cognitifs spécifiques ou multiples, déficience intellectuelle)

Parmi tous ceux-ci, l'épilepsie, les troubles ophtalmologiques, neurovisuels, intellectuels et cognitifs seront plus particulièrement détaillés.

L'**épilepsie** est présente chez 15 à 60% des enfants avec PC, pour une incidence de 0,5% dans la population générale (Badawi et al., 2005; Himmelman et al., 2006). L'épilepsie est plus fréquente et plus précoce chez les enfants avec quadriplégie (entre 50 et 94%, première crise vers 6 mois), que chez les enfants avec hémiplégie (entre 33 et 50%, première crise vers 2 ans) et les enfants avec diplégie (entre 16 et 27%, première crise vers 1 an). Elle est également plus fréquente chez les enfants nés à terme (48%) que chez les anciens prématurés (28%). Les enfants souffrant d'une malformation cérébrale, d'une infection du système nerveux central ou d'une lésion de la substance grise (lésion corticale) présentent plus souvent une épilepsie que les enfants souffrant d'une lésion de la substance blanche (leucomalacie périventriculaire). Sur le plan cognitif, les enfants associant paralysie cérébrale et épilepsie présentent des quotients intellectuels inférieurs et des troubles cognitifs plus nombreux et sévères que les enfants avec paralysie cérébrale isolée. En effet, 60% des enfants avec PC et déficience intellectuelle ont une épilepsie associée alors que cette épilepsie n'est

présente que chez 15% des enfants avec PC sans déficience intellectuelle (Carlsson, Hagberg, & Olsson, 2003; O'Shea, 2008; Wallace, 2001). L'épilepsie est compliquée à stabiliser chez les enfants avec PC car il existe des lésions cérébrales pré-existantes. Elle peut néanmoins être contrôlée de manière efficace dans 50% des cas à l'aide d'un traitement médicamenteux (mono- ou polythérapie en fonction du type de crises). L'association des crises d'épilepsie et du traitement a néanmoins régulièrement des effets négatifs sur les fonctions cognitives, notamment en cas de doses élevées ou de polythérapie. Une difficulté supplémentaire dans le diagnostic et la gestion de l'épilepsie chez les enfants avec PC est qu'elle peut passer inaperçue, soit parce qu'elles consistent en des crises partielles pouvant être confondues avec les mouvements anormaux causés par la spasticité, l'athétose ou la dystonie soit parce qu'il s'agit de décharges épileptiques sans crises cliniques (ex : syndrome POCS).

Au sein des troubles associés, nous allons porter une attention toute particulière aux troubles ophtalmologiques, neurovisuels et cognitifs que les enfants avec PC peuvent présenter en raison de leurs interactions avec les troubles visuo-perceptifs étudiés dans le cadre de ce travail de thèse. Ces troubles sont présentés selon la représentation des processus neurovisuels (Figure 2), distinguant les fonctions oculaires, l'intégrité des champs visuels, les fonctions oculomotrices, la cognition visuelle et la guidance visuelle du mouvement. Pour plus de clarté, les différents troubles cognitifs seront définis en fin de chapitre.

Tableau 2.
Récapitulatif des troubles associés

Troubles musculo-squelettiques	Troubles digestifs	Troubles du sommeil	Troubles respiratoires	Troubles sphinctériens	Douleurs	Troubles de la déglutition
Rétractions musculaires	Reflux gastro-oesophagien	Douleurs nocturnes	Fausse routes silencieuses	Cause neurologique	Ostéo-articulaires	Troubles de la prise alimentaire
Torsions osseuses	Retard staturo-pondéral	Comportement (séparation avec le parent)	Difficultés d'expectoration	Difficultés de déplacement	Somatiques (reflux, constipation)	Fausse routes
Luxations de hanches	Retard pondéral	Installation de l'enfant	Conséquences maladie membranes hyalines	Difficultés de déshabillage	Environnement (positionnement)	Refus d'alimentation
	Surpoids	Causes organiques		Troubles psycho-affectifs	Thérapeutique (manipulations, massages)	Sialorrhée
	Transit	Anomalies du cycle veille-sommeil				

LES TROUBLES OPHTALMOLOGIQUES

Les troubles de la réfraction

Dans la population d'enfants tout-venant (TD), 10% ont un trouble de la réfraction. Parmi ceux-ci, 4,5% sont myopes (baisse de l'acuité visuelle pour la vision à distance), 2,9% hypermétropes (baisse de la vision pour la vision proche) et 3,1% astigmates (baisse de l'acuité visuelle pour les objets proches et à distance causée par une asymétrie subtile de la forme de la cornée). Cette prévalence augmente considérablement chez les enfants avec PC. Sobrado, García-Sá, Usón, & others (1999) mettent en évidence une incidence de la myopie similaire chez les enfants avec PC spastique et les enfants TD alors que l'incidence de l'hypermétropie est significativement supérieure chez ces enfants avec PC spastique (77.4%) par rapport aux enfants TD (16.8%). Kozeis et al. (2007) ont également mis en évidence une incidence plus élevée d'hypermétropie (43%) dans la PC mais également une incidence plus élevée de myopie (16%) et d'astigmatisme (40%) que dans le développement typique.

Les troubles des axes visuels et de la motilité oculaire

Les troubles de la motilité oculaire comprennent le strabisme et le nystagmus. Ces troubles affectent notamment l'exploration visuelle, les saccades oculaires et les capacités de fixation et ils ont donc une influence négative sur les performances visuo-perceptives. Ces troubles peuvent en effet jouer un rôle causal dans la genèse des troubles visuo-perceptifs en empêchant une saisie visuelle correcte des informations (Guzzetta, Mercuri, et al., 2001).

Le strabisme

Le strabisme est caractérisé par un mauvais alignement des yeux que les muscles oculaires n'orientent pas correctement. En fonction des muscles en cause, le strabisme peut être divergent ou convergent. Quand le strabisme est divergent (œil dévié vers l'extérieur), le champ visuel est élargi mais quand le strabisme est convergent (œil dévié vers l'intérieur), le champ visuel est rétréci, l'enfant peut donc être surpris quand

une personne s'approche d'elle par ce côté car elle apparaît subitement dans leur champ visuel (Dutton, 2015).

Le strabisme peut être soit stable soit alternant. Dans la première condition, l'œil déviant est mis hors circuit et ne développe pas ou perd la fonction visuelle (amblyopie). Dans le cas du strabisme alternant, les deux yeux dévient un après l'autre, il n'y a pas de risque d'amblyopie car les deux yeux fonctionnent en alternance. Dans les deux cas, la binocularité et la perception en trois dimensions (perception de la distance, de la profondeur, du relief et de la perspective) sont compromises. L'acuité à tous les niveaux de la rétine est inférieure pour l'œil strabique (Aubry, Francis, Francis, & Tsimba, 2002; Freeman, Nguyen, & Jolly, 1996; Mazeau, 1995; Pagliano et al., 2007; Purves, Augustine, Fitzpatrick, Katz, & others, 1997). Suite au mauvais alignement des yeux, les points correspondants des deux rétines ne forment pas en même temps l'image du même point de l'espace. Néanmoins, le strabisme débutant précocement ne cause pas de diplopie (vision double) car le cerveau en développement de l'enfant ignore la partie centrale de l'image provenant de l'œil strabique et réaligne mentalement la périphérie de l'image provenant de cet œil comme si il regardait bien droit devant (Dutton, 2015).

Le strabisme concerne 3 à 5% des enfants tout-venant. Dans la PC, (Salati, Borgatti, Giammari, & Jacobson, 2002) mettent en évidence un strabisme chez 86% des enfants. (Pagliano et al., 2007), quant à eux, mettent en évidence une dissociation importante en fonction de l'âge gestationnel de l'enfant. Un strabisme est présent chez 93% des enfants nés prématurément et seulement chez 22% des enfants nés à terme, ce qui reste très largement supérieur à son incidence dans la population normale. Aubry et al. (2002), de leur côté, mettent en évidence une répartition strabisme convergent (43%) – strabisme divergent (25%) différente de celle des enfants TD (5 pour 1). Au sein des enfants strabiques de son échantillon (68% du nombre total), ils mettent également en évidence 32% d'incoordination visuo-motrice, définie comme un strabisme d'angle très variable, spécifique aux enfants avec PC nés entre 30 et 33 semaines d'âge gestationnel, au sein duquel les deux yeux fonctionnent séparément, soit un seul œil fixe et l'autre erre dans différentes positions du regard, soit les deux yeux ne fixent pas véritablement et l'on observe soit une divergence, soit une convergence. D'un point de vue clinique, la présence d'un strabisme risque donc d'altérer les différentes fonctions oculo-motrices telles que la fixation oculaire, les

saccades oculaires ou encore la poursuite visuelle. De plus, le strabisme a des répercussions négatives sur l'ensemble des tâches visuo-perceptives et visuo-spatiales présentées aux enfants avec CP (Fazzi et al., 2004; Pagliano et al., 2007).

Le nystagmus

Le nystagmus congénital est défini par une succession de mouvements des yeux involontaires, oscillatoires, courts et saccadés. Douze formes différentes d'oscillation existent selon l'arc réflexe atteint, mais dans la majorité des cas les yeux présentent une oscillation horizontale ou pendulaire. Les mouvements des yeux diminuent l'acuité visuelle, diminution plus marquée pour la vision de loin que la vision rapprochée, en lien avec l'augmentation des mouvements des yeux pour la vision de loin. Il a également des répercussions négatives sur la poursuite et les saccades oculaires. Dans la majorité des cas, il peut être compensé voire bloqué dans certaines positions du regard ou de la tête, ce qui permet alors d'améliorer l'acuité visuelle (Dutton, 2015; Mazeau, 1995; Van Nechel, 2007). Dans leur étude, Aubry et al. (2002) mettent en évidence un nystagmus chez seulement 26% des enfants avec PC alors que dans l'étude de Salati et al. (2002) un nystagmus est présent chez 46% des enfants associant paralysie cérébrale et troubles neurovisuels (CVI). Guzzetta, Mercuri, et al. (2001) montrent quant à eux un nystagmus chez 80% des enfants avec PC et des lésions cortico- sous-corticales et chez 50% des enfants avec PC et leucomalacie périventriculaire. (Jacobson et al., 1998) mettent en évidence, chez ces enfants associant leucomalacie périventriculaire et nystagmus, des troubles associés de poursuite oculaire et de saccades oculaires. Sur le plan clinique, les enfants avec nystagmus risquent donc d'être en difficulté pour la saisie et l'analyse des éléments visuels précis tels que ceux présentés sur les feuilles d'exercices à l'école. Un nystagmus peut également provoquer des difficultés de discrimination figure-fond et de reconnaissance de position dans l'espace chez les enfants avec PC, évalués avec la DTVP II (Fazzi et al., 2004).

L'amblyopie

L'amblyopie peut être définie comme la perte fonctionnelle d'un œil causée par des expériences visuelles binoculaires anormales dans la prime enfance. La représentation corticale de chacun des deux yeux est à peu près égale à la naissance. Cet équilibre se maintient si les deux yeux reçoivent des niveaux comparables de stimulations visuelles. Mais s'il existe un déséquilibre entre les deux yeux (strabisme et/ou anisométrie), l'œil avec la meilleure acuité a un avantage compétitif et prend la place d'un grand nombre de connexions synaptiques de l'autre œil, ce qui entraîne la perte progressive des capacités d'activation des neurones corticaux et la suppression des messages afférents en provenance de l'œil le moins efficient. Fonctionnellement, l'œil ainsi exclu va perdre son acuité visuelle au fur et à mesure jusqu'à devenir aveugle si ce déséquilibre n'est pas corrigé dans la période critique. La thérapie par occlusion peut être efficace uniquement pendant cette période critique qui s'achève vers 8-9 ans, période pendant laquelle le système visuel peut bénéficier de la plasticité des régions corticales concernées. L'occlusion de l'œil préférentiel plusieurs heures par jour pendant de nombreux mois va obliger le cerveau à utiliser de nouveau les stimuli provenant de l'œil amblyopique (Dutton, 2015; Freeman et al., 1996; Polat, Ma-Naim, & Spierer, 2009; Purves et al., 1997). D'un point de vue clinique, l'occlusion de l'œil le plus performant signifie que durant toutes ces heures d'occlusion, l'enfant amblyopique ne peut percevoir et analyser les éléments visuels qu'à l'aide de son œil le moins performant, celui dont l'acuité visuelle et/ou la fonction visuelle est limitée. Les implications sur les apprentissages scolaires sont donc nombreuses tant sur le plan du langage écrit que des mathématiques.

LES TROUBLES NEUROVISUELS

Les troubles neurovisuels désignent les déficits de la fonction visuelle qui surviennent en l'absence de trouble oculaire majeur et qui sont consécutifs à une lésion ou un dysfonctionnement des régions cérébrales postérieures au chiasma optique (Chokron, 2015; Chokron & Demonet, 2010; Fazzi et al., 2009). Les régions corticales et sous-corticales concernées sont notamment impliquées dans la transmission des informations extraites au niveau de la rétine (radiations optiques), dans l'identification (voie ventrale) et la localisation (voie dorsale) des stimuli visuels et dans la planification

du mouvement (cortex pré-moteur). Selon la localisation et l'amplitude de la lésion, les manifestations cliniques des troubles neurovisuels peuvent être extrêmement variées tant dans leur nature que dans leur intensité (Lueck, 2015). Néanmoins, les corrélations entre l'imagerie médicale et les fonctions visuelles ne sont pas toujours cohérentes chez ces enfants, probablement en raison de l'implication de voies visuelles extra-striées et de la plasticité importante du cerveau en développement du jeune enfant.

Chokron (2015) distingue trois catégories de troubles neurovisuels : les atteintes de la vision élémentaire (amputations du champ visuel), les troubles oculomoteurs (fixation, poursuite, saisie et exploration visuelles) et enfin les troubles de la cognition visuelle (altérations des étapes d'analyse et d'intégration des informations visuelles) présentés au sein de la Figure 2. Ces derniers n'ont été ajoutés à la définition originale des troubles neurovisuels qu'en 2001 (Good, Jan, Burden, Skoczenski, & Candy, 2001). Ces trois catégories de troubles ne sont pas strictement indépendantes. En effet, plusieurs auteurs ont démontré les effets délétères des atteintes du champ visuel et des troubles oculomoteurs sur les performances aux tests évaluant la cognition visuelle (Fazzi et al., 2004; Guzzetta, Mercuri, et al., 2001; Pagliano et al., 2007).

Ces troubles neurovisuels sont à l'origine de troubles d'apprentissage (lecture, calcul,...) et peuvent gravement perturber la réalisation des activités quotidiennes, la communication non verbale et les interactions sociales (reconnaissance des visages, des mimiques et des expressions faciales). Ils peuvent même engendrer des troubles du comportement de type autistique se traduisant par un repli sur soi ou par de l'évitement (Chokron, Pieron, & Zalla, 2015; Pawleko, Chokron, & Dutton, 2015). De plus, les fonctions visuelles des enfants atteints de CVI sont affectés significativement par différents facteurs tels que l'environnement direct, les situations non familières, l'inconfort physique, la présence d'épilepsie, le type de médication ou encore la faim ou la fatigue. De ce fait, les capacités visuelles résiduelles des enfants peuvent varier de jour en jour et même d'heure en heure, en lien direct avec leurs capacités d'attention générales et spécifique (Lanners et al. 1999), comme présenté dans la Figure 2.

Les troubles neurovisuels et la paralysie cérébrale partagent plusieurs étiologies telles que les lésions hypoxo-ischémiques, les leucomalacies périventriculaires, les malformations cérébrales congénitales et les infections. Un grand nombre d'enfants

avec PC, dont le pourcentage varie en fonction du type d'atteinte motrice et d'étiologie, présentent des troubles neurovisuels associés différant dans leur nature et leur intensité. Par exemple, plus de 60% des enfants avec PC causée par des lésions hypoxo-ischémiques souffrent de troubles neurovisuels associés.

Les champs visuels

Les champs visuels correspondent à l'ensemble des points de l'espace perçus par un œil immobile fixant droit devant. Sur le plan horizontal, l'œil perçoit 90° à 100° à gauche comme à droite. Sur le plan vertical, il perçoit 40° à 50° vers le haut et 60° à 70° vers le bas. Dans la paralysie cérébrale, les atteintes du champ visuel sont le plus souvent latérales (hémianopsies latérales homonymes) chez les enfants avec hémiplégie ou inférieures chez les enfants nés prématurément. Au sein de la partie supérieure du cortex occipital, la projection des faisceaux supérieurs et inférieurs est très différenciée de part et d'autre de la scissure calcarine. Du fait de la proximité anatomique des deux scissures et de leur vascularisation par le tronc basilaire, les atteintes à ce niveau sont souvent bilatérales. Au sein du cortex pariétal, le faisceau supérieur des radiations optiques se situe près des ventricules et est donc très sensible aux leucomalacies périventriculaires (Aubry et al., 2002; Guzzetta, Mercuri, et al., 2001; Mazeau, 1995).

D'un point de vue clinique, cela signifie que les enfants avec une atteinte des champs visuels, quand ils regardent un endroit déterminé (un point de fixation) n'ont qu'une vue et donc une représentation partielle de leur environnement proche ou des éléments visuels à prendre en considération dans leurs apprentissages scolaires (feuille, référentiel, tableau,...). De nombreux déplacements des points de fixation et de mouvements de tête sont nécessaires afin d'appréhender l'entièreté de cet environnement proche et l'assembler mentalement.

Les fonctions oculo-motrices

Elles comprennent la fixation oculaire, les saccades oculaires, la poursuite visuelle et l'exploration visuelle.

Les troubles oculomoteurs sont très répandus et ont été étudiés à de nombreuses reprises (Guzzetta, Fazzi, et al., 2001; Salati et al., 2002). La prévalence des troubles oculomoteurs varie de 21% à 29% selon la nature du trouble (poursuite visuelle, fixation oculaire, exploration visuelle ou saccades visuelles). Ces troubles oculomoteurs s'accompagnent également dans plus de 70% des cas d'une acuité visuelle binoculaire inférieure à la normale (Guzzetta, Mercuri, et al., 2001). Les effets délétères des troubles oculomoteurs sur les performances aux tests évaluant les processus visuo-perceptifs ont pourtant déjà été démontré (Fazzi et al., 2004; Guzzetta, Mercuri, et al., 2001; Pagliano et al., 2007).

La fixation oculaire

La fixation est la capacité à maintenir son regard sur un point donné malgré les mouvements de la tête et du corps dans le but de centrer l'image à analyser sur le centre de la rétine. Dans la paralysie cérébrale, il existe une instabilité de la fixation dans le sens où elle ne dure que peu de temps et est entrecoupée de saccades erratiques pendant lesquelles les yeux ne semblent pas regarder de cible particulière. Cette instabilité complique la prise d'informations et le suivi visuel et a des répercussions négatives sur les capacités attentionnelles. La fixation peut être atteinte à des degrés divers jusqu'à l'impossibilité de fixer le regard, celui-ci erre alors de façon désordonnée et la cible n'est qu'entraperçue parmi les mouvements aléatoires des yeux (Aubry et al., 2002; Dutton, 2015; Mazeau, 1995). Salati et al. (2002) ont mis en évidence que seuls 16% des enfants avec CP et CVI possèdent des capacités de fixation oculaires normales. Des troubles légers (pertes régulières de la fixation) sont observés dans 63% des cas et des troubles sévères (incapacité de maintenir la fixation) dans 21% des cas. Aubry et al. (2002), quant à eux, font le lien entre les capacités de fixation et l'âge gestationnel chez les enfants avec PC. Plus de la moitié des enfants nés prématurément (< 34 semaines d'âge gestationnel) présentent des troubles de fixation alors que seulement 16% des enfants nés à terme présentent de tels troubles.

Les saccades oculaires

Les saccades oculaires permettent l'orientation rapide du regard grâce à des mouvements rapides pendant lesquels les yeux sautent de la fixation d'un objet à la fixation d'un autre objet. Elles sont déclenchées par l'apparition ou la prise en considération d'un stimulus rétinien périphérique et ont pour but d'amener ce stimulus en vision centrale (Aubry et al., 2002; Dutton, 2015; Mazeau, 1995; Van Nechel, 2007). Dans la paralysie cérébrale, les saccades sont fréquemment ralenties ($200 \pm 30\text{ms}$ pour les enfants tout-venant contre 250 à 600ms pour les enfants avec PC) ou manquent de précision, c'est-à-dire que l'écart entre la position de l'œil et la position de la cible (négligeable chez les enfants tout-venants) peut aller jusqu'à 30% de l'amplitude totale chez les enfants avec PC. L'hypo- ou l'hypermétrie des saccades entraîne donc la multiplication des mouvements oculaires, accentue la lenteur de l'enfant avec PC et pénalise la qualité et l'efficacité de son repérage (Aubry et al., 2002; Salati et al., 2002). Cette hypo- ou hypermétrie est présente chez 64% des enfants avec PC et CVI alors qu'un tiers de ces enfants montrent des mouvements oculaires en arc ou un phénomène d'évitement. Ce phénomène est décrit comme une fuite du regard alors que l'enfant essaie de regarder la cible, fuite du regard suivie d'une saccade hypermétrique de correction (Salati et al., 2002). D'un point de vue clinique, les différents types d'atteinte des saccades oculaires ont des répercussions négatives sur toutes les activités impliquant un balayage visuel coordonné telles que la lecture, l'écriture ou les mathématiques.

La poursuite visuelle

La poursuite visuelle permet le maintien de la fixation sur un objet en mouvement. Ce déplacement oculaire, dont la vitesse est induite par celle de la cible, est régulier et lisse. Le glissement de la cible sur la rétine induit un mouvement oculaire de même amplitude afin de conserver la projection de la cible sur le centre de celle-ci. Plusieurs structures cérébrales dont les cortex occipitaux, pariéto-occipitaux et frontaux sont impliquées et permettent la détection de la position et du déplacement de la cible et la commande motrice requise pour maintenir la cible visuelle sur le centre de la rétine. Néanmoins, toute discordance entre l'amplitude du mouvement oculaire et de celui de la cible induit une dérive progressive des yeux, un retard de poursuite et donc des

saccades de rattrapage. Dans la paralysie cérébrale, la vitesse possible des poursuites oculaires est souvent ralentie. De plus, la poursuite de ces enfants s'apparente plus à des saccades erratiques d'amplitude variable avec des récupérations plus ou moins précises de la trajectoire cible. De nombreuses compensations sont donc nécessaires en effectuant des mouvements avec leur tête pour suivre les cibles plutôt qu'avec leurs yeux, ou en complétant les mouvements oculaires par une rotation de la tête (Aubry et al., 2002; Dutton, 2015; Mazeau, 1995; Van Nechel, 2007). Salati et al. (2002) ont mis en évidence que seul 4% des enfants avec PC et CVI présentent une poursuite visuelle satisfaisante, 75% d'entre eux présentent une poursuite entrecoupée de saccades alors que 21% ne peuvent pas réaliser de poursuite visuelle, ce qui les empêche de suivre du regard tout objet en mouvement.

L'exploration visuelle

La dernière fonction oculomotrice concerne l'exploration visuelle qui permet l'analyse d'un espace donné à l'aide du regard et l'extraction des indices et des informations en fonction du projet de la personne. Les yeux parcourent cet espace donné dans un mouvement de fond lent et régulier sur lequel s'ajoutent des saccades et des fixations en fonction de la détection des éléments pertinents définis par le projet de la personne. L'exploration visuelle nécessite donc l'intégrité des champs visuels et des saccades oculaires ainsi qu'une bonne coordination entre la vision focale et la vision périphérique (Aubry et al., 2002; Mazeau, 1995; Salati et al., 2002).

D'un point de vue clinique, l'exploration visuelle est nécessaire pour prendre en considération les éléments visuels présents dans l'environnement direct. Néanmoins, Salati et al. (2002) ont mis en évidence au sein d'un échantillon d'enfants avec PC et CVI, des troubles sévères de l'exploration visuelle chez 23% de ces enfants et des troubles légers chez 55% d'entre eux. Ce pourcentage élevé de troubles peut en partie s'expliquer par la présence de troubles des saccades oculaires, de fixation et l'atteinte des champs visuels, trois processus dont le fonctionnement normal est indispensable à la réalisation de l'exploration visuelle. La présence d'un tel trouble va donc entraver la prise en considération de l'ensemble des éléments visuels présents dans l'environnement.

La cognition visuelle

La troisième et dernière catégorie de troubles neurovisuels définis au sein de la Figure 2 concerne les troubles de la cognition visuelle impliqués dans les processus d'attention sélective visuelle et les traitements perceptifs (traitements visuo-perceptifs et traitements visuo-spatiaux). Ces troubles visuo-perceptifs seront présentés spécifiquement au sein du chapitre 3.

LES TROUBLES COGNITIFS

Les fonctions attentionnelles et exécutives

Les processus attentionnels et exécutifs présentés au sein de la Figure 2 peuvent être altérés par des lésions de leucomalacie périventriculaire, qui en lésant la substance blanche, diminuent l'inter-connectivité entre les régions pré-frontales et les régions postérieures. Les lésions des ganglions de la base et du thalamus peuvent également provoquer des déficits attentionnels et exécutifs (Bottcher, Flachs, & Uldall, 2010; Straub & Obrzut, 2009), lésions fréquemment rencontrées dans la paralysie cérébrale. Or, les troubles attentionnels et exécutifs ont une influence négative directe sur le fonctionnement des autres processus cognitifs mais également sur les apprentissages scolaires et les interactions sociales (Bottcher et al., 2010).

Les processus attentionnels ont été évalués au sein de différents groupes d'enfants avec paralysie cérébrale de différents types (diplégie, hémiplégie) et degrés de sévérité, associant ou non une épilepsie (Bottcher et al., 2010; Di Lieto et al., 2017; Kolk, Beilmann, Tomberg, Napa, & Talvik, 2001; Pirila et al., 2004, 2007). Ces différentes études ont mis en évidence un déficit significatif des fonctions attentionnelles évaluées (attention sélective visuelle, attention sélective auditive, attention soutenue et attention divisée) chez les enfants avec PC quel que soit leur âge, leur atteinte motrice (diplégie, hémiplégie gauche, hémiplégie droite), et le degré de sévérité de l'atteinte (GMFCS niveaux I à IV). Par ailleurs, Kolk et al. (2001) ont mis en évidence un effet délétère de l'épilepsie et de son ancienneté sur les capacités d'attention soutenue et d'attention divisée de ces enfants avec PC.

Au sein des processus exécutifs, de nombreuses études ont mis en évidence des troubles de l'inhibition (Bodimeade, Whittingham, Lloyd, & Boyd, 2013; Bottcher et al., 2010; Christ, White, Brunstrom, & Abrams, 2003; Di Lieto et al., 2017; Kolk et al., 2001) dont des persévérations (Pueyo et al., 2009), des intrusions pendant les rappels en mémoire à court et long terme (White and Christ 2005) et une impulsivité motrice importante (Pirila, van der Meere, Rantanen, Jokiluoma, & Eriksson, 2011). Ces troubles de l'inhibition sont présents à tous les âges et au sein des différents types d'atteinte motrice mais sont beaucoup plus fréquents chez les garçons, les enfants nés prématurément et ceux présentant des lésions cérébrales bilatérales (Pirila et al., 2011). Des déficits de planification et de flexibilité, un ralentissement de la vitesse de traitement de l'information et un manque de prise d'initiative ont également été mis en évidence chez des enfants avec PC, d'intelligence normale, présentant une diplégie, une hémiplégie ou une quadriplégie (Bodimeade et al., 2013; Bottcher et al., 2010; Christ et al., 2003; Di Lieto et al., 2017; Pirila et al., 2004, 2011). Les enfants avec hémiplégie droite ou gauche ne montrent aucune différence au sein de leurs performances exécutives, il n'existe donc pas d'effet de latéralisation pour ces fonctions (Bodimeade et al., 2013).

En se basant sur la représentation des troubles neurovisuels (Figure 2, page 24) qui présente les liens étroits qui existent entre les fonctions attentionnelles générales et spécifiques, les fonctions exécutives et les processus visuo-perceptifs, il semble indispensable de considérer leur intégrité conjointement lors de toute évaluation. La définition d'un tel profil de compétences/déficits permettrait de déterminer avec plus de précision les situations d'apprentissage optimales (sélection de la pièce, présence ou absence de distracteurs, moment de la journée) en fonction des ressources attentionnelles disponibles et du type de matériel visuel proposé à l'enfant.

Les fonctions visuo-spatiales

Comme présenté au sein de la Figure 2, les fonctions visuo-spatiales dépendent des traitements perceptifs et donc de la cognition visuelle. Au sein de ces fonctions, de nombreux processus sont déficitaires chez les enfants avec PC de différents types d'atteinte motrice et degrés de sévérité (Lidzba, Staudt, Wilke, & Krägeloh-Mann, 2006), notamment la localisation d'éléments dans l'espace (Di Lieto et al., 2017),

l'orientation propre d'un élément (Di Lieto et al., 2017; Fazzi et al., 2004, 2009; Menken, Cermak, & Fisher, 1987), le jugement de distances sur base de différents types d'indices égocentrés et allocentrés (Barca, Pezzulo, & Castelli, 2010), et l'orientation d'un élément par rapport à une cible (Di Lieto et al., 2017; Pirila et al., 2004).

Les fonctions visuo-motrices, visuo-constructives et praxiques

Le dernier niveau présenté au sein de la Figure 2 concerne la guidance visuelle du mouvement qui comprend à la fois la coordination visuo-motrice et les traitements visuo-constructifs.

Les **fonctions visuo-motrices** ont été évaluées à l'aide de différentes tâches de coordination oculo-manuelle, qui mettent toutes en évidence des résultats déficitaires chez les enfants avec hémiplégie ou diplégie spastique (Di Lieto et al., 2017; Fazzi et al., 2004; Fedrizzi et al., 1998; Kolk et al., 2001).

Les **fonctions visuo-constructives**, évaluées à l'aide de différentes tâches de copie de figures de difficulté croissante et de constructions de cubes selon un modèle, sont déficitaires chez une grande majorité des enfants avec PC (Barca, Pezzulo, et al., 2010; Di Lieto et al., 2017; Fazzi et al., 2004, 2009; Pirila et al., 2004) dont certains ne parviennent même pas à réaliser la tâche (Koeda, Inoue, & Takeshita, 1997).

Enfin les **troubles praxiques** sont très fréquemment observés chez les enfants avec PC grâce à différentes tâches de reproduction de position de mains (Croteau et al., 2002; Di Lieto et al., 2017; Pueyo et al., 2009).

L'efficience intellectuelle

L'évaluation de l'efficience intellectuelle est très importante pour situer et comprendre les capacités des enfants. Néanmoins, les échelles d'évaluation traditionnelles, normées avec des enfants au développement typique, proposent de nombreux sous-tests incluant des items pénalisant les enfants avec troubles de la parole (réponse verbale), et/ou troubles moteurs (manipulation de matériel, pointage), et/ou troubles neurovisuels (stimuli visuels complexes). De ce fait, l'efficience intellectuelle de ces

enfants est fréquemment sous-estimée (Delacy & Reid, 2016; Fennell & Dikel, 2001; Yin Foo, Guppy, & Johnston, 2013). Leur intelligence est influencée positivement par la scolarité (Ito, Araki, Tanaka, Tasaki, & Cho, 1997), mais influencée négativement par la présence d'épilepsie (Vargha-Khadem, Isaacs, Van Der Werf, Robb, & Wilson, 1992) et par le type d'atteinte motrice et son degré de sévérité (Dalvand, Dehghan, Hadian, Feizy, & Hosseini, 2012; Delacy & Reid, 2016; Fennell & Dikel, 2001; Ito et al., 1997; Sigurdardottir et al., 2008; Sigurdardottir & Vik, 2011). Tous types d'atteinte motrice confondus, seule la moitié des enfants avec PC présente une efficacité intellectuelle dans les normes (Delacy & Reid, 2016; Yin Foo et al., 2013).

Plus le trouble moteur est sévère, plus le risque de déficience intellectuelle est important en raison de l'importance des lésions cérébrales ou car le trouble moteur, en limitant sévèrement les déplacements autonomes, limitent également à la fois la quantité et la qualité des stimulations reçues de la part de l'environnement (Dalvand et al., 2012; Zabalia, 2004). En effet, deux études à large cohorte ($n=3466$ et $n=662$) ont mis en évidence que les enfants avec hémiplégie et diplégie ont une intelligence dans les normes dans 45 à 68% des cas, et une déficience intellectuelle sévère seulement dans 5 à 15% des cas. À l'inverse, les enfants avec quadriplégie ont une intelligence préservée dans seulement 13 à 26% des cas mais présentent une déficience intellectuelle sévère dans plus de 40% des cas. Selon la classification GMFCS, les enfants pouvant marcher avec ou sans restrictions (niveaux I et II) ont une intelligence dans les normes dans 54 à 74% des cas alors qu'ils ne sont que 4 à 15% quand ils ne peuvent pas se déplacer de manière autonome (niveau V). À ce moment, ils présentent une déficience intellectuelle sévère dans plus de 50% des cas (Dalvand et al., 2012; Delacy & Reid, 2016).

Enfin, différentes études ont mis en évidence une dissociation significative entre les quotients intellectuels verbal et performance, le quotient verbal étant dans les normes et supérieur au quotient performance, qui lui est inférieur aux normes (Fennell & Dikel, 2001; Pirila et al., 2004; Sabbadini, Bonanni, Carlesimo, & Caltagirone, 2001; Vargha-Khadem et al., 1992). Il est donc important d'étudier ces deux quotients distinctement et ne pas se satisfaire du quotient total qui reflète seulement un point médian et pas les forces et les faiblesses de l'enfant (Fennell & Dikel, 2001). De ce fait, Stiers et al. (2001, 1999, 2002; 2004), au sein de leurs différentes études sur les processus visuo-perceptifs et visuo-spatiaux, utilisent le niveau de raisonnement non verbal (quotient

performances) et non le quotient verbal ou l'âge chronologique pour appairer les enfants présentant une pathologie neuro-développementale avec des enfants au développement typique. Cet appariement permet donc de ne pas surestimer la présence de troubles visuo-perceptifs et le nombre de processus déficitaires en basant l'analyse des résultats de ces enfants avec troubles neuro-développementaux sur leur niveau de fonctionnement réel.

Les fonctions langagières

Suite à une lésion précoce de l'hémisphère gauche touchant les aires du langage, un processus de réorganisation cérébrale intra- ou inter-hémisphérique se met en place pour préserver les capacités langagières. En fonction de la taille et de la localisation de cette lésion précoce, les aires endommagées de l'hémisphère gauche peuvent être fonctionnellement substituées par des régions non lésées de l'hémisphère gauche ou de l'hémisphère droit. Cette réorganisation est un processus à long terme provoquant un retard de langage qui se résorbe au fur et à mesure du développement de l'enfant, en fonction des processus atteints par la lésion cérébrale. Cette réorganisation des capacités langagières au sein de l'hémisphère droit a néanmoins des répercussions négatives sur les fonctions visuo-perceptives et visuo-spatiales dans la mesure où le langage va employer les réseaux neuronaux requis pour ces fonctions non-verbales. A l'inverse, il n'existe pas de phénomène de réorganisation cérébrale suite à une lésion précoce de l'hémisphère droit afin de préserver les fonctions visuo-perceptives et visuo-spatiales (Brizzolara et al., 2002; Croteau et al., 2002; Lidzba et al., 2006).

Au sein de la paralysie cérébrale, la moitié des enfants présente des difficultés pour communiquer oralement, et un enfant sur cinq ne présente pas de langage oral intelligible. La dysarthrie, définie par une altération de l'articulation de la parole et de la mobilisation du souffle, est due à un trouble moteur des systèmes phonatoires. Elle entraîne une faible précision de l'expression orale, et donc des difficultés de communication avec autrui (Sigurdardottir & Vik, 2011). La sévérité de la dysarthrie est directement liée à la sévérité de la paralysie cérébrale, les plus hauts niveaux de GMFCS (niveaux IV et V) sont associés à une plus grande prévalence et un degré de sévérité plus important, et est liée au type d'atteinte motrice.

Les enfants avec hémiplégie et diplégie (de 4 à 9 %) présentent significativement moins de dysarthrie que les enfants avec quadriplégie ou dyskinésie (54 à 61%) (Delacy & Reid, 2016; Sigurdardottir & Vik, 2011).

L'absence de langage oral intelligible peut également être due à une déficience intellectuelle sévère (Sigurdardottir & Vik, 2011). Les enfants présentant une déficience intellectuelle (quotient intellectuel inférieur à 70) associent des troubles articulatoires et des déficits de compréhension et d'expression verbale alors que les enfants avec un quotient intellectuel dans les normes ne montrent, dans la grande majorité des cas, que des troubles articulatoires (Pirila et al., 2007). Ces capacités de compréhension et d'expression verbales sont également négativement influencées par la présence et l'ancienneté de l'épilepsie (Kolk 2001) et par le type et la sévérité des troubles moteurs (Pueyo et al., 2009; Sigurdardottir & Vik, 2011; Straub & Obrzut, 2009), les enfants avec dyskinésie montrant moins de difficulté de compréhension que les enfants avec spasticité (Pueyo et al., 2009). Néanmoins, il ne semble pas y avoir de consensus au sein de la littérature. En effet, deux études ont mis en évidence des résultats contradictoires concernant les capacités d'expression verbale au sein d'échantillons d'enfants avec diplégie spastique, évalués à l'aide de la NEPSY (Korkman, Kirk, Kemp, & Plaza, 2003). Pirila et al. (2004) ont mis en évidence des processus phonologiques dans les normes mais un déficit en dénomination rapide, alors que Di Lieto et al. (2017) ont mis en évidence le profil inverse de performances.

Les fonctions mnésiques

En mémoire à court terme (MCT ; boucle phonologique et registre visuo-spatial), il n'existe pas de consensus au sein de la littérature. Certains auteurs mettent en évidence des déficits chez les enfants avec PC de différents types et degrés de sévérité (Di Lieto et al., 2017; Himmelmann et al., 2006; Menken et al., 1987; White & Christ, 2005) alors que d'autres auteurs mettent en évidence des performances comparables aux enfants au développement typique appariés sur l'âge chronologique (Pirila et al., 2004) en MCT auditivo-verbale et visuelle. Kolk et al. (2001) mettent en évidence une influence délétère de l'épilepsie et de son ancienneté sur les performances en MCT.

Carlsson (1997) met en évidence un effet de la latéralisation, les enfants avec hémiplégie gauche obtiennent des performances inférieures aux enfants avec hémiplégie droite et aux enfants au développement typique en MCT visuo-spatiale.

Concernant l'administrateur central auditivo-verbal et visuo-spatial, les enfants avec PC montrent des performances inférieures aux enfants au développement typique (Menken et al., 1987; Pueyo et al., 2009). Ces performances sont influencées négativement par la présence d'épilepsie et par son ancienneté (Kolk et al., 2001) et par le type de paralysie cérébrale (Pueyo et al., 2009). Les enfants avec dyskinésie ne présentent aucune difficulté. Au sein de la forme mixte, 50% des enfants ont des performances auditivo-verbales déficitaires alors que seuls 20% d'entre eux présentent un déficit sur le plan visuo-spatial. Au sein de la spasticité, les enfants sont déficitaires dans 40 à 90% des cas, en fonction des tests utilisés.

En mémoire à long terme (MLT) auditivo-verbale, visuelle et visuo-spatiale, les enfants avec PC de différents types et degrés de sévérité ne montrent pas de déficit en comparaison avec les enfants au développement typique (Carlsson, 1997; Kolk et al., 2001; Pirila et al., 2004; White & Christ, 2005). Néanmoins, une étude récente (Di Lieto et al., 2017) a mis en évidence des déficits en MLT auditivo-verbale et visuelle chez les enfants nés prématurément avec diplégie spastique évalués à l'aide de la NEPSY 2 (Korkman, Kemp, & Kirk, 2012). De plus, les performances en MLT semblent être influencées négativement par la présence d'épilepsie et par son ancienneté (Kolk et al., 2001) et par la présence de spasticité (Pueyo et al., 2009).

CHAPITRE 3

LES TROUBLES VISUO- PERCEPTIFS CHEZ LES ENFANTS AVEC PARALYSIE CÉRÉBRALE

Seules quelques études ont tenté de caractériser les troubles visuo-perceptifs dans une population composée exclusivement d'enfants avec PC. En effet, les troubles visuo-perceptifs ont été plus largement étudiés chez des enfants souffrant de troubles neurovisuels dans le cadre de pathologies mixtes dont la paralysie cérébrale (Ortibus, Lagae, Casteels, Demaerel, & Stiers, 2009). Par exemple, l'étude de Stiers (1999) portant sur les troubles neurovisuels chez les enfants avec lésion cérébrale périnatale ne comporte qu'un quart d'enfants atteints de PC et leur pattern de performance n'a pas été spécifiquement analysé. Certains troubles visuo-perceptifs (traitement global-local, appariement de positions dans l'espace) ont également été décrits chez des enfants avec lésions cérébrales périnatales mais sans atteinte motrice (Stiles, Reilly, Paul, & Moses, 2005).

Parmi les études qui ont spécifiquement étudiés les troubles visuo-perceptifs chez l'enfant atteint de PC, il est par ailleurs très difficile de dégager des résultats clairs et reproductibles et de comparer les études compte-tenu de la variabilité importante des méthodologies utilisées. Cette variabilité se retrouve à tous les niveaux de la recherche, de la sélection des tests et des enfants à l'analyse des résultats. Premièrement, le choix des tests est très hétérogène. En effet, les différentes batteries utilisées ne mettent pas en jeu les mêmes processus visuo-perceptifs, et donc ne permettent pas d'étude systématique des différents composants du traitement visuo-perceptif. De plus, les fondements théoriques sous-jacents aux différentes batteries utilisées ne sont pas les mêmes, ce qui induit une variabilité importante dans la construction, le choix et les modalités de présentation des items. Enfin, certaines tâches font intervenir simultanément plusieurs processus. En cas de trouble, il n'est donc pas possible de déterminer avec précision quel est le traitement déficitaire.

En outre, la taille des échantillons et les critères de sélection des enfants sont très variables d'une étude à l'autre. Certaines d'entre elles basent effectivement leurs résultats sur un échantillon de taille très limitée (moins de 20 enfants avec PC) (Barca, Pezzulo, et al., 2010; Fedrizzi et al., 1998; Schmetz, Detraux, & Barisnikov, 2013) malgré l'importante hétérogénéité de la population des enfants avec PC. Les autres recherches citées comprennent plus de 20 enfants, dont deux seulement en comptent plus de 60 (Kozeis et al., 2007; Stiers et al., 2002).

Concernant les critères de sélection utilisés, quelques études se sont focalisées sur les enfants avec diplégie spastique (Fazzi et al., 2004, 2009; Fedrizzi et al., 1998; Koeda et al., 1997; Pagliano et al., 2007; Pueyo et al., 2009) alors que les autres n'ont spécifié aucune restriction préalable quant au type d'atteinte motrice ou à sa localisation. Quelques études ont sélectionné les enfants avec PC sur base de la présence de leucomalacie périventriculaire (Fazzi et al., 2004, 2009; Haard, Niklasson, Svensson, & Hellström, 2000; Pagliano et al., 2007; van den Hout et al., 2004). Seules cinq ont sélectionné des enfants avec PC ayant une acuité visuelle normale ou corrigée (Fazzi et al., 2004, 2009; Kozeis et al., 2007; Pueyo et al., 2009; Tsai, Lin, Liao, & Hsieh, 2009). Enfin, le fonctionnement intellectuel des enfants étant très souvent variable, certaines recherches incluent des enfants présentant un retard mental léger à modéré (Fazzi et al., 2004, 2009; Koeda et al., 1997; Kozeis et al., 2007) alors que d'autres ne sélectionnent que les enfants ayant un fonctionnement intellectuel supérieur à 80

(Barca, Cappelli, Di Giulio, Staccioli, & Castelli, 2010; Barca, Pezzulo, et al., 2010; Fazzi et al., 2007). Dans ces conditions, il est difficile de tirer des conclusions sur base des résultats obtenus car ces particularités méthodologiques remettent en question les possibilités de généraliser les résultats à d'autres enfants atteints de PC.

Comme présenté au sein du chapitre 2, le type d'atteinte motrice (spasticité, dyskinésie, ataxie) et sa localisation (diplégie, hémiplégie, quadriplégie et tétraplégie) sont pourtant des facteurs qui semblent influencer les performances cognitives des enfants atteints de PC. D'un point de vue visuo-perceptif, seule la moitié des enfants dyskinésiques présentent un déficit dans une tâche de jugement d'orientation de lignes alors que 89% des enfants avec forme mixte et 100% des enfants spastiques présentent un déficit dans cette même tâche (Pueyo et al., 2009). Par contre, aucun déficit visuo-perceptif n'a pu être mis en évidence à l'aide de la batterie L94 chez les enfants atteints de PC avec dyskinésie ou forme mixte alors que les enfants spastiques obtiennent des résultats déficitaires à un ou plusieurs sous-tests de la L94 évaluant la reconnaissance d'images présentées sous des points de vue inhabituels (Stiers et al., 2002). Concernant la localisation de l'atteinte motrice, il a été montré que la proportion d'enfants atteints de PC présentant une réduction des quotients visuo-perceptifs et visuo-spatiaux à la batterie ABCDEFV est plus importante chez les enfants quadriplégiques (66% et 70% respectivement) que chez les enfants hémiplegiques (43% et 40% respectivement) ou diplégiques (16% et 26% respectivement) (Barca, Cappelli, et al., 2010).

L'étude de Fazzi (2012) marque une première avancée sur le plan méthodologique car elle a pris en compte les variables citées ci-dessus dans le but de caractériser de manière fidèle la fréquence des troubles ophtalmologiques et neurovisuels -dont les troubles visuo-perceptifs- des enfants avec paralysie cérébrale. Son dispositif méthodologique lui permet de décrire le tableau clinique de l'ensemble de ces troubles au sein d'un même échantillon de 129 enfants avec PC en tenant compte de la localisation de l'atteinte motrice (diplégie, hémiplégie et tétraplégie). Sur le plan ophtalmologique, peu d'enfants atteints de PC avec diplégie présentent une stéréopsie de bonne qualité (18%). En revanche, la majorité d'entre eux montrent des troubles de la réfraction (74%) tels que l'hypermétropie (33%) et le strabisme (88%). Sur le plan oculo-moteur, la fixation (23%), la poursuite (78%) et les saccades oculaires (86%) sont altérées. Sur le plan visuo-perceptif, 30% des enfants obtiennent un quotient

perceptif global moyen inférieur (QP entre 80 et 90) et 30% ont un quotient faible à déficitaire (QP inférieur à 80) au DTVP II. Les enfants atteints de PC avec hémiplégie présentent une réduction unilatérale des champs visuels (65%), l'absence de stéréopsie (59%), un nystagmus (59%) et des troubles de la réfraction (88%). Sur le plan oculo-moteur, la fixation (23%), la poursuite (59%) et les saccades (59%) sont altérées. Sur le plan visuo-perceptif, à peine 7% des enfants ont un quotient perceptif global largement déficitaire (inférieur à 70). Enfin, le profil des enfants PC avec tétraplégie est caractérisé par des troubles de la réfraction (79%), un nystagmus (87%) et un strabisme (67%). Sur le plan oculomoteur, la fixation (79%), la poursuite (98%) et les saccades (100%) sont donc atteintes chez la grande majorité de ces enfants. Sur le plan visuo-perceptif, les enfants avec tétraplégie n'ont pas pu être évalués à l'aide du DTVP II en raison de l'importance de leurs atteintes visuelles et motrices.

Si cette étude donne une première indication de la fréquence des troubles visuo-perceptifs en fonction de l'atteinte motrice, elle ne permet cependant pas de spécifier la nature des troubles visuo-perceptifs car elle se réfère à un quotient visuo-perceptif global basé sur des tests évaluant des processus très différents (discrimination figure-fond, groupement perceptif, position dans l'espace, constance d'objet). Cette critique s'applique également à d'autres études qui basent leurs analyses sur des quotients globaux ou sur des notes composites regroupant les performances obtenues à plusieurs tests, ce qui ne permet pas de discerner les profils visuo-perceptifs sous-jacents (Haard, Aring, & Hellström, 2004; Kozeis et al., 2007; Pagliano et al., 2007; Stiers et al., 2002; Tsai et al., 2009). Ce choix méthodologique se traduit par une hétérogénéité très importante dans les résultats. En effet, les déficits mis en évidence varient de 12,5% à 100% pour les quotients visuo-perceptifs et de 25% à 85% pour les quotients visuo-moteurs des enfants atteints de PC. Dans l'ensemble, ces études confirment donc la présence de déficits des traitements visuo-perceptifs, visuo-spatiaux et/ou visuo-moteurs auprès de la majorité des enfants atteints de PC. Néanmoins, aucun profil de déficits et de compétences spécifiques ne peut être dégagé.

Par ailleurs, l'étude de Fazzi et al. (2012), tout comme une grande majorité d'études sur le sujet, n'a pas sélectionné de groupe contrôle et compare directement les performances des enfants atteints de PC aux normes existantes (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2004, 2007; Haard et al., 2004; Kozeis et al., 2007; Pagliano et al., 2007; Pueyo et al., 2009; Tsai et al., 2009), soit un appariement très grossier sur

base de l'âge chronologique. Parmi les études qui ont eu recours à un groupe de référence, seules deux études utilisent des règles strictes d'appariement sur l'âge chronologique (Menken et al., 1987; Schmetz et al., 2013) et trois études utilisent un appariement sur l'âge mental (Schmetz et al., 2013; Stiers et al., 2002; van den Hout et al., 2004). Pourtant l'intérêt de ce critère d'appariement a été démontré à plusieurs reprises (Stiers et al., 1999; Stiers & Vandenbussche, 2004; Zuidhoeck, Hyvarinen, Jacob, Henriksen, 2015). En effet, l'intelligence non verbale est inférieure à l'intelligence verbale dans de nombreux troubles neurologiques précoces tels que la paralysie cérébrale, l'hydrocéphalie et les lésions de leucomalacie périventriculaire.

Le fait de comparer les enfants atteints de PC à des enfants de même âge chronologique ou de même niveau d'intelligence verbale peut alors provoquer un biais dans l'interprétation des résultats aux tests visuo-perceptifs caractérisé par une augmentation du nombre et de l'importance des troubles. Par contre, l'utilisation de l'âge mental non verbal, calculé à l'aide d'épreuves de raisonnement non verbal, comme ligne de base pour comparer les performances visuo-perceptives des enfants avec PC permet d'atténuer voire de supprimer ce biais d'interprétation et de mettre en évidence les troubles visuo-perceptifs réels de l'enfant compte tenu de son niveau de raisonnement non verbal.

Enfin si l'étude de Fazzi et al. (2012) contrôle le type d'atteinte motrice, elle laisse de côté toute une série de variables qui peuvent néanmoins influencer les résultats. De manière générale, les études prennent souvent le soin de caractériser leur échantillon d'enfants avec PC (prématurité, type et localisation de l'atteinte motrice, troubles neurovisuels, genre, épilepsie, etc) mais très peu utilisent ces caractéristiques dans leurs analyses pour dissocier des profils de performances, notamment du fait de la petite taille des échantillons. Concernant l'âge gestationnel par exemple, Pagliano et al. (2007) ont pourtant mis en évidence un effet de la prématurité sur les traitements visuo-perceptifs chez les enfants PC à l'aide du DTVP II.

Les enfants avec PC nés à terme obtiennent des quotients visuo-perceptifs et visuo-moteurs équivalents aux enfants au développement typique. Par contre, les enfants avec PC nés prématurément présentent des quotients visuo-perceptifs et visuo-moteurs déficitaires, respectivement dans 12% et 25% des cas.

Afin de limiter l'hétérogénéité des échantillons inhérente à la PC, plusieurs auteurs (Fazzi et al., 2004, 2009; Fedrizzi et al., 1998; Koeda et al., 1997) se sont focalisés sur les enfants prématurés atteints de diplégie spastique. Les processus visuo-perceptifs (processus intégratifs et de transformation), visuo-spatiaux, visuo-moteurs et visuo-constructifs ont été évalués auprès de deux échantillons d'enfants âgés de 5 à 8 ans (Fazzi et al., 2004) et de 6 à 15 ans (Fazzi et al., 2009). Au sein des traitements perceptifs (cfr figure 2, page 30) et plus particulièrement des processus intégratifs, le groupement perceptif (23% à 65% des enfants, respectivement) et la discrimination figure-fond (25% à 64% des enfants, respectivement) sont déficitaires.

La reconnaissance des positions dans l'espace, utilisée pour évaluer les traitements visuo-spatiaux est déficitaire chez 45% des enfants. Au sein de la guidance visuelle du mouvement, la coordination oculo-manuelle, évaluant l'intégration visuo-motrice, est déficitaire chez 75% des enfants de 5 à 8 ans. Au sein des processus visuo-constructifs, 50 à 75% des enfants sont respectivement en difficulté lors de la copie de figures et 55% des enfants de 6 à 15 ans sont déficitaires pour la reproduction de modèles basés sur des relations topologiques. Malgré le fait que les auteurs se soient focalisés sur une sous-population très spécifique d'enfants atteints de PC, une grande variabilité subsiste dans les résultats. Celle-ci est probablement encore imputable au fait que ni l'âge mental non verbal ni la présence de troubles neurovisuels ne sont pris en considération dans l'analyse des résultats de ces deux échantillons d'enfants.

CHAPITRE 4

SPÉCIFICITÉS DE L'ÉVALUATION DE L'ENFANT AVEC PARALYSIE CÉRÉBRALE

Du fait de leurs lésions cérébrales précoces, les enfants avec PC se développent avec un répertoire neurocognitif particulier. En effet, la lésion cérébrale, les remaniements cérébraux qu'elle provoque, la plasticité cérébrale et les expériences sensori-motrices et cognitives inhabituelles s'influencent mutuellement dès les stades les plus précoces du développement. Il est donc difficile de prendre le développement typique et ses étapes-clés comme modèle de référence chez les enfants avec PC, qui dès leur plus jeune âge ont mis en place des stratégies de développement et d'apprentissage différents dans les domaines de la cognition.

Dès lors, dans toute évaluation de l'enfant avec PC, il faut considérer les différentes limitations spécifiques que l'enfant peut cumuler telles que des troubles moteurs pouvant entraver la manipulation, des troubles visuels pouvant restreindre la saisie visuelle des informations ou encore des troubles langagiers pouvant limiter la compréhension des consignes et l'énonciation des réponses, la ou les difficultés observées sur le plan cognitif mais également les liens étroits existant entre tous ces paramètres pendant le développement de l'enfant.

Cette évaluation a pour objectif de situer l'enfant avec PC par rapport aux normes des enfants de son âge mais surtout elle doit permettre de comprendre comment l'enfant fonctionne et de mettre en évidence ses stratégies d'apprentissage et leur efficacité. L'analyse qualitative de la performance et des erreurs, et l'observation du comportement sont donc également fondamentales dans l'évaluation cognitive des enfants avec PC. L'évaluation des fonctions intellectuelles et cognitives est donc primordiale car elle peut amener des informations très utiles pour déterminer les forces, les faiblesses et les besoins spécifiques de ces enfants concernant leurs apprentissages et pour guider les prises en charge ultérieures (Badawi et al., 2005; Croteau et al., 2002; Pueyo et al., 2009; Sabbadini et al., 2001; Tourrette, 2014) . Néanmoins, du fait de leurs limitations et de leur développement atypique, l'évaluation standardisée est très difficile avec les enfants avec PC et ne permet pas de saisir le potentiel réel de ces enfants. La standardisation n'est pas respectée dans le sens où un ou plusieurs exemples supplémentaires doivent être donnés pour s'assurer de la bonne compréhension de la tâche, le rythme de présentation des items doit être ralenti, les délais de réponse doivent être allongés, la durée des séances d'évaluation doit être raccourcie en raison de la fatigabilité de ces enfants avec PC, et l'ordre de passation des tests, voire des items au sein d'un test peut être modifié. Toutes ces adaptations ont pour objectif d'obtenir des résultats reflétant les capacités réelles de ces enfants (Croteau et al., 2002; Pueyo et al., 2009; Tourrette, 2014).

Enfin, l'adaptation des modes de réponse (grapho-motricité, manipulation de matériel, réponses verbales longues) est nécessaire avec la grande majorité des enfants avec PC en leur fournissant des aides techniques adaptées afin de leur permettre de répondre de manière autonome sans l'intervention de l'expérimentateur. Ces interventions peuvent en effet influencer le choix de réponses de l'enfant via des messages involontaires et implicites telles que des hésitations, le temps laissé pour chaque stimulus au sein d'un item ou les intonations de voix de l'examineur pendant la manipulation du matériel (Sabbadini et al., 2001).

Par ailleurs, durant toute évaluation de l'enfant atteint de PC, il est primordial d'être particulièrement attentif aux caractéristiques de l'environnement telles que le lieu (école, domicile, bureau, hôpital), les autres rendez-vous de la journée, la disposition du bureau et la présence de distracteurs auditifs et visuels qui peuvent, plus que chez d'autres enfants, influencer leurs performances. Du fait de leur histoire médicale

(présence d'épilepsie, type de médication, présence de troubles associés) et de leurs expériences antérieures des situations de tests, les enfants peuvent parfois aborder les évaluations avec un niveau de motivation et des affects différents comparativement aux enfants au développement typique. Il en va de même pour l'état physique de l'enfant (installation confortable, douleurs, faim, fatigue) qui, selon le handicap, peut être source d'inconfort pour des périodes de tests prolongées. Ces facteurs doivent impérativement être pris en considération au moment de l'évaluation et lors de l'analyse des résultats.

PARTICULARITÉS DE L'ÉVALUATION DES FONCTIONS VISUELLES SUPÉRIEURES

Les différents tests évaluant les fonctions visuelles supérieures disponibles sur le marché sont présentés dans le tableau 3 en fonction du plus haut niveau de traitement requis dans l'épreuve. Néanmoins, seule une minorité de ces tests n'évalue sélectivement qu'un seul processus visuel isolé. Malgré tout, ces tests fournissent un grand nombre d'informations pertinentes pour l'établissement du profil spécifique de l'enfant grâce à l'analyse et l'observation qualitatives de leur réalisation et des stratégies utilisées dans les différentes tâches (Ortibus, De Cock, & Lagae, 2011). Pour chacun de ces tests papier-crayon, le type de réponse à fournir et le type de matériel à analyser est explicité afin de pouvoir opérer le choix le plus adapté aux particularités motrices, neurovisuelles, intellectuelles et cognitives des enfants PC.

Pour chaque niveau de traitement, les enfants atteints de PC peuvent être en difficultés dans leur passation pour différentes raisons et de différentes manières. Pour commencer, l'atteinte motrice de l'enfant avec PC a une influence délétère sur les processus impliqués dans la guidance visuelle du mouvement et donc, sur toutes les tâches pour lesquelles les modalités de réponse impliquent une composante motrice comme la tenue d'un crayon, le pointage, la désignation et la manipulation du matériel.

Il est donc fréquemment nécessaire voire indispensable d'adapter le mode de passation. Par exemple, il est possible de proposer à l'enfant d'utiliser un marqueur tampon au lieu d'un crayon dans les épreuves de barrage (comme c'est le cas dans la WPPSI-IV) ou encore de pointer la place de la bonne réponse au lieu de devoir manipuler lui-même les cartes réponses. Ces adaptations simples permettent à l'enfant

de ne pas dépenser de l'énergie et des ressources cognitives inutilement. L'atteinte motrice peut également provoquer une dysarthrie chez l'enfant avec PC, qui selon son degré de gravité, rendra le langage de cet enfant plus ou moins intelligible. Si l'examineur éprouve des difficultés à le comprendre, il devra soit demander à un parent ou un thérapeute de l'accompagner (avec les distorsions que cela peut impliquer) soit choisir un test évaluant le même processus mais dont la modalité de réponse est l'appariement (désignation). Sur le plan langagier, une problématique de retard simple de langage ou de dysphasie peut entraîner un retard d'acquisition du vocabulaire. Dans ce cas, il est également préférable d'opter pour les tâches d'appariement plutôt que pour les tâches de dénomination.

Concernant les troubles neurovisuels, les atteintes du champ visuel (vision tubulaire, vision périphérique, hémianopsie) ont également une influence significative sur les performances cognitives des enfants. L'impossibilité de percevoir dans l'entière du champ visuel empêche l'enfant d'avoir une vision complète et unifiée de tout matériel visuel. Il perçoit donc l'environnement comme morcelé car il ne peut analyser qu'une partie à la fois sans systématiquement faire le lien entre les différentes parties perçues. L'intégrité du champ visuel doit donc impérativement être vérifiée avant toute évaluation neuropsychologique chez les enfants atteints de PC sous peine de biaiser significativement les résultats. Par exemple, à une épreuve de barrage (recherche visuelle de cibles parmi des distracteurs), l'enfant dont le champ visuel est amputé ne percevra pas les stimuli du côté de cette amputation (la moitié gauche ou droite en fonction du type d'hémianopsie) quand son point de fixation se situe au centre de la page. Il devra donc déplacer ce point de fixation vers le côté amputé afin de percevoir les stimuli. Les troubles oculomoteurs tels que les troubles de l'organisation du regard (fixation, saccades,...) ont également des répercussions négatives sur la réalisation des différentes épreuves proposées.

En effet, dans les épreuves de barrage (attention sélective visuelle), les enfants PC risquent d'oublier certains endroits de la page et passer à plusieurs reprises à d'autres. Dans les épreuves d'appariement d'une cible avec une des possibilités de réponse (en fonction de différents critères), l'enfant risque d'omettre une ou plusieurs possibilités de réponses voire un ou plusieurs items s'ils sont présentés sur une même page. L'examineur doit donc être particulièrement vigilant, pointer du doigt et s'assurer que l'enfant passe chaque possibilité de réponse dans son champ visuel. Cette adaptation

permet de s'assurer que le résultat obtenu par l'enfant reflète bel et bien ses performances réelles à la tâche d'appariement et non l'absence de prise en considération de réponses ou d'items en raison d'un trouble oculomoteur ou d'un déficit du champ visuel.

Au sein de la cognition visuelle, un trouble de l'attention sélective visuelle et de l'exploration visuelle peut provoquer des déficits au sein de l'évaluation des traitements perceptifs et de la guidance visuelle du mouvement. En effet, une saisie des informations visuelles de mauvaise qualité ou une exploration insuffisante de l'environnement vont empêcher la prise en considération de la totalité des informations visuelles disponibles et nécessaires pour les niveaux de traitement ultérieurs. Ces traitements, basés sur des informations incomplètes ou imprécises, ne pourront donc pas réaliser d'analyses perceptive et/ou spatiale efficaces. Pendant le bilan, l'examineur doit donc, comme dans le cas de troubles oculomoteurs, s'assurer que l'enfant prend bien toutes les informations visuelles en considération grâce au pointage ou la mise en place de codes couleurs par exemple.

Concernant les traitements perceptifs, les troubles de reconnaissance vont évidemment avoir un effet significatif sur l'ensemble des traitements nécessitant une reconnaissance préalable tels que les traitements visuo-spatiaux, l'intégration visuo-motrice et les traitements visuo-constructifs. Par exemple, comment pourrait-on prendre en main une bouteille en plastique en ajustant le déplacement du bras, l'ouverture de la main et sa pression si cette bouteille n'a pas été reconnue en tant que telle. De même, une atteinte des traitements visuo-spatiaux risque également d'altérer l'intégration visuo-motrice et les traitements visuo-constructifs. En effet, comment l'enfant pourrait-il manipuler de manière optimale le matériel s'il ne perçoit pas correctement leur orientation et/ou les distances entre les différentes pièces. Comment réaliser un puzzle si l'enfant ne peut pas localiser ou agencer les pièces les unes par rapport aux autres sur base d'un modèle. Il faut donc à ce niveau faire la distinction entre les différentes causes possibles de résultat déficitaire aux tests visuo-moteurs et visuo-constructifs. L'enfant a-t-il échoué en raison de troubles de l'analyse spatiale sans atteinte motrice ni praxique, en raison de troubles moteurs consécutifs à sa paralysie cérébrale ou encore en raison de troubles praxiques. Cette distinction, rendue possible par la comparaison et l'observation qualitative des différents tests réalisés, est essentielle pour la mise en place d'un programme thérapeutique autour de l'enfant.

Tableau 3.
Récapitulatif des tests disponibles sur le marché

Niveaux d'analyse	Tests	Âges (années ; mois)	Mode de réponse	Matériel présenté
Processus visuels élémentaires	Champs visuels EVA	4 à 6	Conduite oculaire	Visage de l'expérimentateur et crayon-jouet
	Poursuite visuelle EVA	4 à 6	Conduite oculaire	Crayon-jouet
	Fixation oculaire EVA	4 à 6	Pointage	Visage de l'expérimentateur
	Extinction visuelle EVA	4 à 6	Pointage	Visage de l'expérimentateur et 2 crayons-jouet
Attention sélective visuelle Et exploration visuelle	Barrages WPPSI IV	2;6 à 7;7	Barrage	Animaux et objets quotidiens
	Barrages WISC IV	6 à 16;11	Barrage	Animaux et objets quotidiens
	Attention sustained LEITER III	3 à 75+	Barrage	
	Attention visuelle NEPSY	3 à 12;11	Barrage	Animaux et objets quotidiens
	Barrages EVA	4 à 6	Barrage	Animaux et objets quotidiens, « A » orientés
Processus perceptifs Analyse précoce	Appariement de formes EVA	4 à 6	Appariement	Objets quotidiens et figures géométriques
	Visual perception BEERY VMI	2 à 18	Appariement	Figures géométriques
	Matching LEITER R	2 à 10;11	Appariement	Animaux, objets quotidiens, figures géométriques
	Visual discrimination TVPS 3	3 à 18;11	Appariement	Figures géométriques
Analyse intermédiaire Groupement perceptif Discrimination figure-fond	Closure K ABC II	3 à 12;11	Dénomination	Animaux et objets quotidiens
	Closure DTVP III	4 à 12;11	Appariement	Figures géométriques
	Form completion LEITER III	3 à 75+	Appariement	Animaux et objets quotidiens
	Closure TVPS 3	3 à 18;11	Appariement	Figures géométriques
	Figure-ground DTVP III	4 à 12;11	Appariement	Figures géométriques
	Figure-ground LEITER III	3 à 75+	Appariement	Animaux et objets quotidiens
	Figures enchevêtrées EVA	4 à 6	dénomination	Animaux et objets quotidiens
	Visual figure-ground TVPS 3	3 à 18;11	Appariement	Figures géométriques
Analyse tardive Constance de formes	Form constancy DTVP III	4 à 12;11	Désignation	Figures géométriques
	Form constancy TVPS 3	3 à 18;11	Désignation	Figures géométriques
	Puzzle d'images NEPSY 2	7 à 16;11	Désignation	Photographies de paysage
Processus associatifs	Dénomination d'images WPPSI IV	2;6 à 7;7	Dénomination	Animaux et objets quotidiens
	Picture context	2 à 5;11	Désignation	Animaux et objets

	LEITER R			quotidiens
	Dénomination d'images WISC IV	6 à 16;11	Dénomination	Animaux et objets quotidiens
	Complètement d'images WPPSI IV	2;6 à 7;7	Dénomination	Animaux et objets quotidiens
	Complètement d'images WISC IV	6 à 16;11	Dénomination	Animaux et objets quotidiens
Traitements visuo-spatiaux	Flèches NEPSY 2	5 à 16;11	Pointage	Cibles et flèches
	Orientation NEPSY 2	5 à 12;11	Pointage	Plan
	Puzzles géométriques NEPSY 2	5 à 16;11	Appariement	Figures géométriques
	Dénombrement cubes K ABC II	5 à 12;11	Dénomination	Figures géométriques (représentation en 2D½)
	Position in space DTVP II	4 à 10;11	Appariement	Figures géométriques
	Paper folding LEITER R	6 à 20;11	Appariement	Figures géométriques
	Figure Rotation LEITER R	11 à 20;11	Appariement	Figures géométriques
Traitements visuo-moteurs	Précision visuo-motrice NEPSY 2	5 à 12;11	Tracé	Chemins avec chronomètre
	Eye Hand coordination DTVP III	4 à 12;11	Tracé	Chemins sans chronomètre
Traitements visuo-constructifs	Copie de figures NEPSY 2	5 à 16;11	Copie	Figures géométriques
	Copy BEERY VMI	2 à 18;11	Copie	Figures géométriques
	Copy DTVP III	4 à 12;11	Copie	Figures géométriques
	Figure de Rey	3 à adultes	Copie et mémoire	Figures géométriques
	Spatial relations DTVP II	4 à 10;11	Copie	Figures géométriques au sein de points de repères
	Cubes NEPSY 2	5 à 16;11	Construction	Cubes
	Triangles K ABC II	3 à 12;11	Construction	Figures géométriques à manipuler
	Cubes WPPSI IV	2;6 à 7;7	Construction	Cubes
	Cubes WISC IV	6 à 16;11	Construction	Cubes
	Assemblage d'objets WPPSI IV	2;6 à 7;7	Puzzle	Animaux et objets quotidiens

Note. EVA (Chokron, 2015; Vilayphonh et al., 2009), LEITER R (Roid & Miller, 1997), LEITER 3 (Roid et al., 2013), NEPSY (Korkman et al., 2003), NEPSY 2 (Korkman et al., 2012), DTVP 2 (Hammil, Pearson & Voress, 1993), DTVP 3 (Hammil et al., 2013), WPPSI IV (Wechsler, 2014), WISC IV (Wechsler, 2005), Beery VMI (Beery, Buktenica & Beery, 2010), TVPS 3 (Martin, 2006), K-ABC II (Kaufman & Kaufman, 2008), Figure de Rey (Mesmin, 2009).

PARTIE EXPERIMENTALE

Problématique

La présence de troubles visuo-perceptifs chez les enfants avec PC a donc été confirmée par de nombreuses études. Toutefois, des différences méthodologiques importantes entre les études donnent un tableau encore très imprécis des troubles visuo-perceptifs chez les enfants atteints de PC. Enfin, les facteurs associés à la PC tels que le type d'atteinte motrice, sa localisation, l'étiologie ou encore la présence d'une déficience intellectuelle ou de troubles neurovisuels n'ont souvent pas été pris en compte. L'impact de ces facteurs sur les performances des enfants est encore très largement sous-estimé. Il en résulte que les résultats varient énormément en fonction des critères de sélection des enfants et des épreuves utilisées.

À ce stade, il reste à déterminer si les difficultés des enfants avec PC décrites dans la littérature témoignent d'un retard global dans le développement des processus visuo-perceptifs ou de troubles visuo-perceptifs spécifiques plus circonscrits. La nécessité de pousser plus loin l'analyse des profils d'enfants avec PC appelle la création d'outils d'évaluation précis permettant l'analyse de l'ensemble des processus visuo-perceptifs en jeu. Ces batteries de tests devront être spécifiquement adaptées à l'évaluation des enfants au développement typique, mais surtout aux particularités des enfants atteints de troubles neuro-développementaux qui sont plus vulnérables aux troubles neurovisuels et plus spécifiquement aux troubles visuo-perceptifs. Les modalités de présentation des items et les modalités de réponses devraient donc être simplifiées.

Dans le cadre de ces troubles neurovisuels, les temps de présentation des items ne devraient pas être limités afin de laisser le temps aux enfants d'analyser visuellement les informations. Enfin, les outils d'évaluation doivent viser à l'analyse des différents niveaux de traitement visuo-perceptif afin de définir des profils de déficits et de compétences complets et fiables, tenant compte des caractéristiques de l'enfant (atteintes motrices, troubles neurovisuels, étiologie et déficience intellectuelle associée) et de permettre d'orienter le choix des stratégies de réadaptation.

L'**objectif principal** de ce travail est d'investiguer les capacités de reconnaissance visuelle des objets (sous forme d'images) chez les enfants avec PC à l'aide d'une nouvelle batterie de tests informatisés (BEVPS) particulièrement adaptée à leurs

problématiques motrices et visuelles. Pour atteindre cet objectif, quatre études ont été menées dans le cadre de cette thèse. Elles utilisent toutes la terminologie basée sur la représentation des fonctions neurovisuelles chez l'enfant (Figure 2. page 24). L'analyse des processus visuo-spatiaux pouvant être évalués à l'aide de la BEVPS (localisation dans un cadre, topologie, évaluation des distances) tels que décrits brièvement dans l'étude 1 ne font pas l'objet d'une étude développementale ni d'une étude comparative (enfants TD – enfants avec PC) au sein de ce travail de thèse.

Les batteries de tests utilisées dans les recherches chez les enfants TD ou présentant une pathologie neuro-développementale ne prennent pas en considération l'ensemble des processus visuo-perceptifs répartis dans les différents niveaux d'analyse. En effet, la batterie L94 (Stiers et al., 2001) permet l'évaluation de certains processus des trois niveaux d'analyse (traitement des caractéristiques de base, processus intégratifs et processus de transformation), et de l'analyse visuo-spatiale mais ne permet pas l'évaluation du traitement de chaque caractéristique de base séparément (longueur, surface, orientation, position), le traitement local-global et l'accès aux connaissances structurales stockées en mémoire (décision d'objets). La batterie DTVP II (Hammil et al., 1993) utilisée dans les études de Fazzi et al. (2004, 2007, 2009, 2012) avec des échantillons d'enfants avec PC évalue les processus intégratifs et de transformation et certains processus visuo-spatiaux, mais ne prennent pas en considération l'évaluation du traitement de chacune des caractéristiques de base et du traitement local-global. Les études sur les fonctions visuo-perceptives dans l'agnosie développementale, l'autisme et le spina-bifida de Joy & Brunsdon (2002), Gillet, Chabernaud, Batty, Barthélémy, & Jambaqué (2009) et Swain, Joy, Bakker, Shores, & West (2009) utilisent la BORB (Humphreys & Riddoch, 1993) permettant l'évaluation des différents niveaux d'analyse mais ne permet pas l'évaluation du traitement local-global, du groupement perceptif et du complètement d'objets. De ce fait, la BEVPS a été créée. Elle a pour objectif l'évaluation des processus visuo-perceptifs inclus dans les différents niveaux d'analyse (traitement des caractéristiques de base, processus intégratifs et processus de transformation) et certains processus visuo-spatiaux (localisation dans un cadre, topologie, évaluation des distances). Cette batterie prend en considération les particularités des enfants atteints de troubles neuro-développementaux, c'est-à-dire une présentation des stimuli visuels simple, répétitive de tâche en tâche et sans limite de temps, ainsi qu'un mode de réponse motrice (appui sur un contacteur) et orale (un

mot) simplifiés. L'**étude 1** permettra de définir les différents tests créés au sein de cette batterie et la méthodologie associée et de proposer une première validation de ces tests grâce à un échantillon de 179 enfants TD de 5 à 14 ans. La sensibilité à l'âge, la cohérence interne, la validité théorique et la validité convergente de ces tests seront présentés ainsi qu'une première ébauche des trajectoires développementales typiques, non par test mais par niveau d'analyse visuo-perceptif et visuo-spatial.

Les trois études suivantes évalueront respectivement les trois niveaux de traitement du modèle de reconnaissance visuelle des objets d'Humphreys et Riddoch (1987) en utilisant le même **design expérimental** sur base d'un échantillon d'enfants TD et d'un échantillon d'enfants avec PC. Chaque étude, divisée en deux expériences distinctes, permettra d'une part la mise en évidence du développement typique de chaque niveau de traitement auprès d'un échantillon de 215 enfants TD âgés de 4 à 14 ans et de 20 adultes âgés de 20 à 25 ans. Cette *première expérience* aura donc pour objectif de déterminer les courbes développementales et les âges auxquels les processus atteignent un niveau de performances équivalent à celui des adultes. D'autre part, la *deuxième expérience* comparera de manière systématique les performances d'un échantillon de 86 enfants avec PC âgés de 5 à 14 ans à deux échantillons d'enfants TD appariés soit sur l'âge chronologique au mois près (TDca) soit sur le niveau de raisonnement non verbal (TDnv). Ce deuxième appariement a été réalisé sur la note brute obtenue (avec un écart d'un point maximum) par les enfants des deux groupes aux Matrices Progressives Colorées de Raven (1998), test fréquemment utilisé dans la littérature pour l'évaluation de l'intelligence non verbale chez les enfants atteints de différents types de pathologies neuro-développementales (Falkman, Sandberg, & Hjelmquist, 2002; Giovagnoli, 2001; Lezak, 2004; Pueyo et al., 2009; Strauss, Sherman, & Spreen, 2006; Weichbold & Herka, 2003). Les critères d'inclusion des enfants avec PC comprennent une spasticité, l'absence de malformation cérébrale, d'encéphalopathie épileptique, de méningite et la réussite de la tâche de contrôle qui atteste d'une bonne compréhension de la disposition du matériel et des consignes.

L'utilisation d'une **méthodologie** identique pour l'ensemble des enfants et des processus visuo-perceptifs permet de comparer les performances entre les groupes d'enfants et entre les tests. En premier lieu, la comparaison des performances entre les enfants avec PC et les enfants TDca au sein des tests évaluant les différents processus visuo-perceptifs permet la mise en évidence de la *globalité* ou à l'inverse de

la sélectivité des déficits chez les enfants avec PC. Dans un second temps, la comparaison entre les enfants avec PC et les enfants TDnv permet la mise en évidence de la *spécificité* de l'atteinte des fonctions visuo-perceptives et donc de déterminer si les déficits mis en évidence sont liés à un retard intellectuel ou non. Si l'atteinte est spécifique, les enfants avec PC présenteront des performances significativement inférieures aux enfants TDca mais également aux enfants TDnv. En dernier lieu, les *courbes développementales* des enfants avec PC et des enfants TDca sont comparées afin de déterminer si les fonctions visuo-perceptives se développent simultanément au sein des deux groupes d'enfants ou non. En cas de retard développemental, nous tenterons de déterminer si les enfants avec PC présentent un simple retard développemental qui diminue progressivement avec l'âge pour ne plus représenter de différence significative avec le développement typique au sein des groupes d'âge les plus élevés (Figure 3a). Les enfants avec CP peuvent également présenter un retard qui apparaît avec l'âge (Figure 3b), ce qui signifie que les enfants les plus jeunes obtiennent des performances équivalentes au développement typique et que l'écart à la norme s'installe progressivement. Pour les deux types de trajectoires précédentes, les enfants avec PC présentent des performances équivalentes aux enfants au développement typique pour certaines tranches d'âge, alors que pour les trois types de trajectoires suivantes, les enfants avec PC présentent des performances significativement inférieures aux enfants au développement typique quel que soit leur âge. La différence entre les performances des enfants TD et les enfants avec PC peut être présente dès le plus jeune âge et rester identique tout au long du développement de l'enfant avec PC, le retard peut donc être considéré comme stable et persistant (Figure 3c). La différence entre les performances peut également augmenter significativement durant le développement de l'enfant avec PC, le retard peut donc être considéré comme persistant et augmentant avec l'âge (Figure 3d). Enfin, la différence entre les performances peut diminuer significativement durant le développement de l'enfant avec PC, le retard peut donc être considéré comme persistant mais diminuant avec l'âge (Figure 3e).

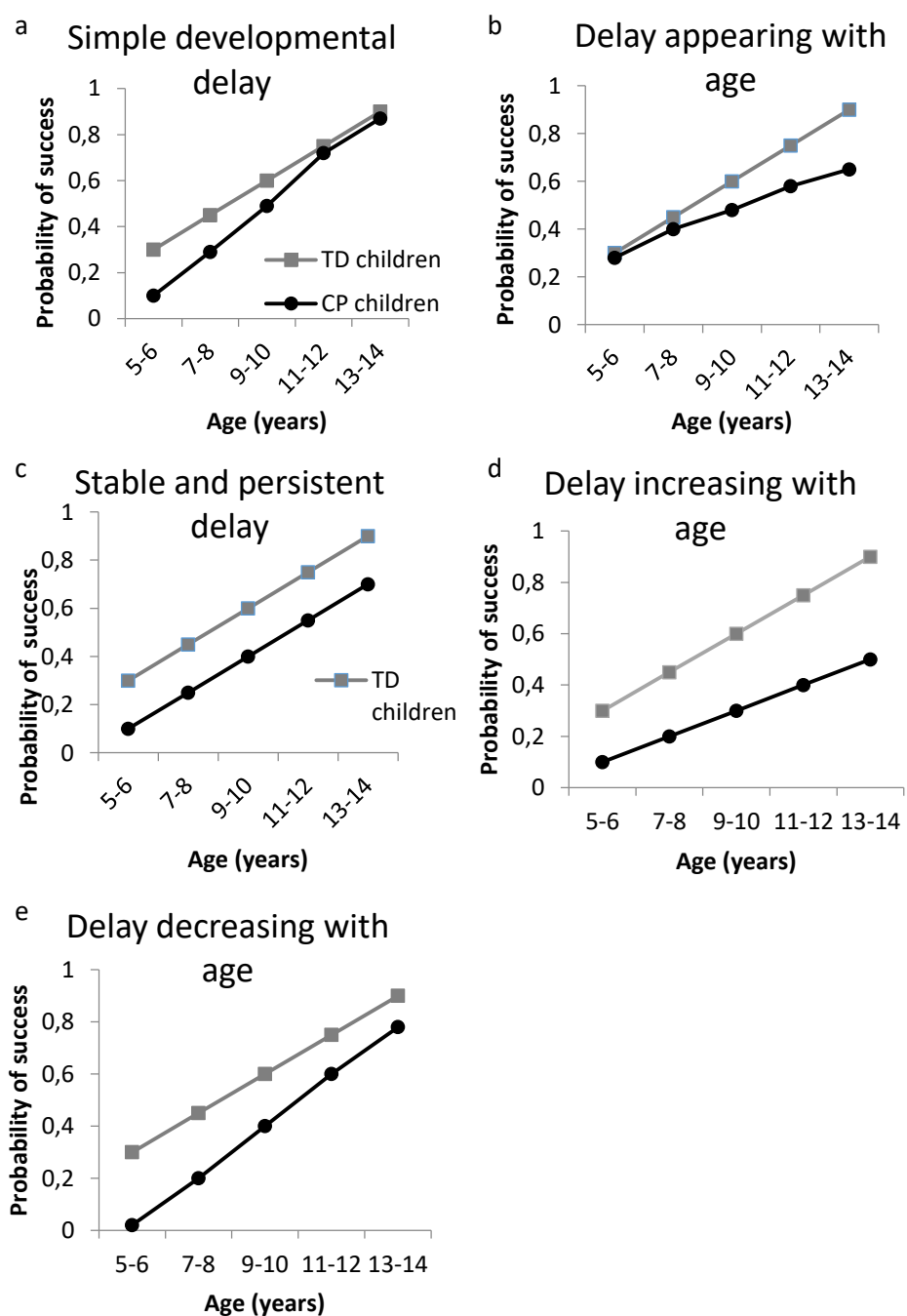


Figure 3. Représentation des différents types de retards développementaux. (a) simple retard développemental, (b) retard apparaissant avec l'âge, (c) retard stable et persistant dans le temps, (d) retard augmentant avec l'âge et (e) retard diminuant avec l'âge.

Selon la méthodologie prédéfinie, l'**étude 2** traitera de l'analyse des caractéristiques visuelles de base (longueur, surface, orientation et position), correspondant au premier niveau d'analyse d'Humphreys et Riddoch (1987b), évaluées à l'aide de quatre tests de la BEVPS (longueur, surface, orientation, position).

Par la suite, l'**étude 3** traitera des processus intégratifs basés sur les représentations des objets dépendantes du point de vue (discrimination figure-fond, groupement perceptif et traitement global-local), correspondant au niveau d'analyse intermédiaire d'Humphreys et Riddoch (1987b), et évalués à l'aide de trois tests de la BEVPS (figures enchevêtrées, figures dégradées silhouettes et traits, figures hiérarchisées).

Enfin, l'**étude 4**, traitera des processus de transformation basés sur les représentations des objets indépendantes du point de vue et sur l'accès aux représentations structurales stockées en mémoire, correspondant au niveau d'analyse tardif, pré-sémantique du modèle d'Humphreys et Riddoch (1987b), et évalués à l'aide de trois tests de la BEVPS (constance d'objets dessins et images, décision d'objets, complètement d'objets).

THE BEVPS: A NEW TEST BATTERY TO ASSESS VISUAL PERCEPTUAL AND SPATIAL PROCESSING ABILITIES IN 5-14 YEAR-OLD IN CHILDREN.

Emilie SCHMETZ, Laurence ROUSSELLE, Cécile BALLAZ, Jean-Jacques DETRAUX,
Koviljka BARISNIKOV

Applied Neuropsychology: Child (Published online 20 June 2017)

Abstract

This study aims to examine the different levels of visual perceptual object recognition (early, intermediate, and late) defined in Humphreys and Riddoch's model as well as basic visual spatial processing in children using a new test battery (BEVPS). It focuses on the age sensitivity, internal coherence, theoretical validity, and convergent validity of this battery. French-speaking, typically developing children ($n=179$; 5 to 14 years) were assessed using 15 new computerized subtests. After selecting the most age-sensitive tasks through ceiling effect and correlation analyses, an exploratory factorial analysis was run with the 12 remaining subtests to examine the BEVPS' theoretical validity. Three separate factors were identified for the assessment of the stimuli's basic features (F1, four subtests), view-dependent and -independent object representations (F2, six subtests), and basic visual spatial processing (F3, two subtests). Convergent validity analyses revealed positive correlations between F1 and F2 and the Beery-VMI visual perception subtest, while no such correlations were found for F3. Children's performances progressed until the age of 9-10 years in F1 and in view-independent representations (F2), and until 11-12 years in view-dependent representations (F2). However, no progression with age was observed in F3. Moreover, the selected subtests, present good-to-excellent internal consistency, which indicates that they provide reliable measures for the assessment of visual perceptual processing abilities in children.

Keywords: visual perceptual processes, child, development, object recognition

INTRODUCTION

Visual perception refers to the processes involved in the detection and recognition of visual information and determines the way in which something is seen, known, and understood (Dutton & Lueck, 2015). Indeed, visual perception is fundamental to the development of cognitive, academic, and social skills (Chokron et al., 2010).

As object recognition is involved in all daily activities, it is evidently an important aspect of visual perceptual processing. Several theoretical models on visual object recognition have been elaborated from behavioral data collected in healthy and brain-damaged adults. One of the most renowned theoretical frameworks is Humphreys and Riddoch's model (1987b), which distinguishes two processing stages in visual object recognition. Firstly, the pre-semantic processing stage allows an object to be correctly perceived based on visual input and to be associated with structural knowledge. Secondly, the semantic processing stage allows the elaborated percept to be associated with semantic and functional knowledge about objects and to be named. Each processing stage encompasses multiple sub-processing steps that can be selectively impaired following a brain lesion (Rumiati, Humphreys, Riddoch, & Bateman, 1994). Studies with brain-damaged adults showed a clear dissociation between pre-semantic and semantic processing stages, in case of right or left lateralized lesions (Warrington & Taylor, 1978), and in cases of integrative agnosia (Butter & Trobe, 1994; De Renzi & Lucchelli, 1993; Humphreys & Riddoch, 1987b).

This paper will focus on the pre-semantic processing stage including four levels (Charnallet, 1998; Humphreys & Riddoch, 1987b, 2006). The first level known as "early analysis" regroups the processes involved in the treatment of basic shape components and in the parallel coding of the local and global features of the object (internal details and contours). In the second level called "intermediate analysis," local and global traits are integrated to form a complete and flexible representation of objects (Humphreys & Riddoch, 2006; Riddoch et al., 2008). The parallel processes at work in intermediate analysis enable figure-ground discrimination and visual closure, and allow local and global perceptual features to be grouped into a global view-dependent representation of the object. These processes play a crucial role in the perceptual organization of the visual world by allowing us to use individual objects while ignoring background

information. The third processing level known as “late analysis” leads to the elaboration of a 3D-object structures representation that is a view-independent representation of the object. As a result, objects that are presented from different points of view could be matched with episodic representations stored in memory at each encounter with this object, on the basis of one or more distinctive characteristics (i.e., main axis, critical distinctive features, Humphreys & Riddoch, 1987). The fourth, pre-semantic processing level, allows access to stored knowledge on the physical characteristics of forms and objects, and to match these with a prototypical representation stored in the long-term memory (Humphreys & Riddoch, 2006; Peissig & Tarr, 2007). These two last processing levels are regrouped into the name “late analysis” as they both included mnesic representations.

As can be read above, the pre-semantic stage involves different processing levels that allow the construction of an elaborated percept based on the view-dependent and independent representations of object and, on the access to stored structural knowledge. In contrast, the semantic stages include the access to stored semantic and functional knowledge in long-term memory, and the object naming (Humphreys & Riddoch, 1987a, 2006; Riddoch et al., 2008).

Based on their theoretical model and clinical observations of subgroups of brain-damaged adults, (Humphreys & Riddoch, 1993) developed the Birmingham Object Recognition Battery (BORB) to characterize specific patterns of impairments. However, while the BORB is a useful screening tool for the assessment of a large number of perceptual processes, some processes are not examined with this tests battery. For example, in terms of intermediate processing, only figure-ground discrimination is evaluated, and no test is proposed to assess visual closure and local-global processing abilities. Moreover, some BORB's drawings are unattractive or represent objects that are little or not at all known to children (e.g., thimble). Finally, the efficient use of objects and the interaction with them also depends on spatial processing skills such as the object's location and its spatial orientation (Chaix & Albaret, 2014; Dutton, 2015; Schmetz & Rousselle, 2016), but these are not represented in Humphreys and Riddoch's model (1987b).

Considering the importance of object recognition abilities in daily life and learning, it is surprising that no tools simultaneously assess the different visual perceptual

processing levels and visual spatial processing skills in children. Such tools are crucial for the precise assessment of visual perceptual and spatial impairment in children, as they could help to determine whether and how these deficits influence cognitive development and learning abilities. In fact, many different visual perceptual tasks (mainly based on adult theoretical models) are currently used to assess these abilities in typically developing (TD) and brain-damaged children. However, to the best of our knowledge, no study has assessed all visual perceptual and spatial processing abilities simultaneously using consistent methodology.

Table 1 below presents a review of existing literature on the assessment of visual perceptual and spatial processing in TD children and reveals that none of the assessment tools allow a complete evaluation of the different visual perceptual processes. For each study, the table reports the age of participants, the clinical comparison group, and the assessment tools used in reference to the different pre-semantic processing levels of Humphreys and Riddoch's model.

Three studies used the original BORB subtests to assess early, intermediate, and late perceptual processing in 7- to 11-year-old TD children, and children with neuro-developmental pathologies (Gillet et al., 2009; Joy & Brunsdon, 2002; Swain et al., 2009). These studies highlighted the difficulties faced by participants in different clinical groups compared to TD children matched for chronological or mental age. Joy & Brunsdon (2002) found that a child with a developmental visual agnosia without brain lesion shows deficits in all three processing levels. Swain et al. (2009) showed that children with myelomeningocele and hydrocephalus diagnosed at birth display deficits in both early and late processing levels, in particular in the length judgment and the object constancy subtests. Conversely, Gillet et al. (2009) reported that children with autism showed equal performances in the different levels of analyses, except in orientation and location processing in these children, showed higher performances than TD children matched on mental age. Unfortunately, clinical groups were very small and could not reflect the heterogeneity of cognitive processing present in children with different neuro-developmental pathologies. Moreover, the developmental trajectory of these processes was not examined in TD children. It should be also noted that early processes were assessed with all four BORB subtests, while intermediate processes were assessed with only one subtest (figure-ground discrimination).

Over the last ten years, a series of other batteries have been set up and used to examine the typical development of visual perceptual processes during childhood. For example, the Visual Object and Space Perception Battery (Warrington & James, 1991), allowing the assessment of intermediate and late perceptual processing levels as well as spatial processing, was developed for adults, and then was used to collect normative data for a German-speaking population of TD children aged between 8 and 12 years (Weber, Pache, Lütshg, & Kaiser, 2004). Likewise, both the Developmental Test of Visual Perception, third edition (Hammil et al., 2013) and the L94 visual perceptual battery (Stiers et al., 1999) were specifically created to assess intermediate and late visual perceptual processing and visual spatial processing in 4- to 12-year-old English-speaking children and 2.5- to 7-year-old Flemish-speaking children, respectively. The different subtests assess the intermediate and late processing levels, but again neglect to evaluate the early processing components. Moreover, Stiers et al. (2001) tested TD children using the L94 visual perceptual battery to collect normative data, but the typical developmental trajectory was not systematically examined. The Test of Visual Perceptual Skills (TVPS 3; Martin, 2006), standardized for English-speaking children and adolescents aged between 4 and 19 years, includes different subtests assessing intermediate and late visual perceptual processing, as well as visual memory and visual spatial processing. No test for the assessment of early visual perceptual processing component is included in those four batteries of tests.

Recently, Chokron (2015) developed the Evaluation of Visual Attention Processing (EVA), a battery of tests designed to screen for visual attention disorders in 4- to 6-year-old French-speaking children (Vilayphonh et al., 2009). This battery includes subtests that assess various neurovisual processing (e.g., visual pursuit, visual fields), visual cognitive abilities (e.g., visual memory for shapes, selective visual attention) and certain visual perceptual abilities (e.g., figure-ground discrimination, shape matching) and thus constitute a useful assessment of neurovisual processes. However, it does not provide a complete screening of visual perceptual processing.

Finally, Pisella et al. (2013) developed a battery with six tasks inspired by the BORB and VOSP subtests and tested French-speaking children between the ages of 4 and 12 years. These tests assess only the early level of perceptual processing (e.g. length, surface) and basic spatial characteristics (e.g., localization, orientation).

Table 1.
Studies on visual perceptual and spatial processing in TD children

Study	Population	Ages	Tasks	Analysis level
Bova et al., 2007	115 TD children	6 to 11 years 5 months	Poppelreuter Ghent test Street completion test Unusual perspectives Unusual lighting Imaginary figures	Intermediate Intermediate Late Late Late
Bezrukikh & Terebova, 2009	898 TD children	5 to 7 years	DTVP II: figure-ground discrimination DTVP II: constancy of shape DTVP II: position in space	Intermediate Late Spatial
Vilayphonh et al., 2009	111 TD children	5 years	EVA overlapping figures EVA fruit puzzles EVA shape and letter matching	Intermediate Late Early
Pisella et al., 2013	96 TD children	4 to 12 years	Length comparison Size comparison Angle comparison Position	Early Early Early Spatial
Stiers et al., 2001	327 TD children	2 years 9 months to 6 years 6 months	L94: visual matching L94: De Vos task L94: overlapping figures L94: matching block designs L94: line drawings occluded by noise L94: unconventional object views	Early Intermediate Intermediate Spatial Intermediate Late
Weber et al., 2004	30 TD children	8 to 12 years	VOSP: Incomplete letters, shape decision, progressive silhouettes VOSP: silhouettes VOSP: position discrimination, number location, cube analysis	Intermediate Late Spatial
Joy & Brunsdon, 2002	6 TD children (matched to a child with agnosia)	7 years	BORB: size, length, orientation and localization BORB: overlapping figures	Early Intermediate
Gillet et al., 2009	8 TD children (matched to autistic children)	5 years	BORB: size, length, orientation, localization BORB: overlapping figures BORB: object decision	Early Intermediate Late
Swain et al., 2009	21 TD children (matched to children with spina bifida)	8 to 11 years	BORB: size, length, orientation, localization BORB: overlapping figures BORB: object decision	Early Intermediate Late

None of the aforementioned studies provides a systematic assessment of the development of different visual perceptual and spatial processes in the same sample of children. Among the studies examining the visual perceptual or spatial processes (Table 1), very few reported data on the developmental course of these processes in children. As a result, there is currently no model that depicts the developmental trajectory of visual perceptual and spatial processing abilities in children or that gives indications on the hierarchy of the different visual perceptual processes in this population. Some studies reported that visual object recognition develops gradually with age in TD children (Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007). Pisella et al. (2013) show a significant development of early analysis processes between the ages of 4 and 12 years with the assessment of length, size, position, and angle comparisons. Bova et al. (2007) highlighted that several processes of visual perception such as figure-ground discrimination (intermediate) as well as object constancy and view-independent object recognition (late) develop only after the age of 6 years. Some of these processes such as the perception of visual closure continue to progress after the age of 11 years. In adulthood, objects can be recognized from partial views, different points of views, or partially occluded views, indicating that the different levels of processing have matured. (Pereira & Smith, 2009) showed that very young children are able to recognize simple objects when presented as a whole, while 2 year olds can recognize familiar objects by processing only local parts or prototypical details of these objects. From the age of 5 years, children can recognize objects by processing local parts and a global shape as well as from outline drawings.

In summary, the different batteries of tests used to assess the typical development of visual perceptual and spatial processes in TD children provide some information regarding the developmental trajectory of the underlying processes. However, no study to date has simultaneously assessed the different processing levels of the pre-semantic stage as well as basic visual spatial processing skills in the same sample of children with typical or atypical development. Furthermore, most batteries of tests are narrow in scope; they include only a few items and provide a global score for each process without contrasting the different presentation conditions and levels of difficulties (no individual score for each condition is available). As a result, the global view of the developmental trajectories of the specific processes of visual perception remains fragmented and incomplete.

In light of these findings and concerns, the aim of the present study is to assess the different processing levels of the pre-semantic stage defined in the Humphreys and Riddoch's model (1987b) as well as the basic visual spatial processing (essential for optimal object manipulation and interaction) in TD children using a new computerized battery of tests. Mainly inspired by the BORB, the subtests were supplemented with others in order to complete the assessment of intermediate visual perceptual processing such as visual closure and local-global processing abilities. The involvement of praxis, visual construction, motor, and language functions is strictly limited. It is hoped that this new tool will be of use in future studies on visual perceptual disorders in children with neuro-developmental pathologies such as Cerebral Palsy who are at risk for associated disorders such as motor disabilities, oculomotor deficits, reduced short-term memory abilities, and language impairments.

To assess the different levels of the pre-semantic processing stage (i.e. analysis of basic visual features, view-dependent and view-independent object representations, and access to structural knowledge), and basic visual spatial processes (spatial location and evaluation of distances), all BEVPS (Battery for the Evaluation of Visual Perceptual and Spatial processing in children) subtests were administered to a sample of TD children aged between 5 and 14 years. The distribution of performances was examined separately according to age and visual perceptual and spatial processing levels in order to select the most appropriate tasks by removing any that were considered too long, difficult, easy, or redundant. Exploratory factorial analysis was also performed to assess the latent factor structure of our different subtests.

Finally, convergent validity was examined between the performances for our subtests using a valid test (i.e., Visual Perception subtest of the Beery-Buktenica Developmental Test of Visual-Motor Integration, VMI, 2010).

METHODS

Participants

This explorative study included 179 TD children aged between 5 and 14 years 11 months divided into five age groups (Table 2). The criteria for exclusion were the following: the presence of a neuro-developmental disorder (including Cortical Visual Impairment) or a medical pathology resulting in school absenteeism, the repetition of a grade in school, a learning disability, and an uncorrected eye disorder. Children included in the sample were drawn from middle-class schools in the Walloon Region, Belgium, and were tested by examiners trained to apply the method and guidelines for the administration of the tests. Informed consent was obtained from the participants and their parents in accordance with the Declaration of Helsinki.

Table 2.
Distribution of typically developing children

Ages	Number of children (girls - boys)		Mean age
5-6 years	19	17	5 years 11 months
7-8 years	17	19	7 years 11 months
9-10 years	18	18	9 years 10 months
11-12 years	17	18	12 years 1 month
13-14 years	18	18	13 years 11 months

Materials

The new tests battery is administered on a laptop with a 15.6-inch screen. Before presenting each item, a screen appeared with a central fixed point for a duration fixed at 1200 ms to respect the speed processing of information of the youngest children and children with neuro-developmental pathologies. Responses were recorded using the Superlab © 4.5 software (Cedrus Corporation, San Pedro– USA). To respond, the child had to press one of three colored switches (6 cm in diameter each yellow on the left, blue in the middle, and red on the right) corresponding to the correct response. The three switches were embedded in a wooden support and placed on the table in front of the laptop (Fig. 1).



Figure 1. Computer with the three response switches.

We have created fifteen subtests with new attractive drawings using Paint.net free software (dotPDN LLC), Gimp free software (The GIMP Team), and Publisher software (Microsoft Office 2013) to assess the different visual perceptual and spatial processes in children. The subtests were classified into three groups: (a) visual perceptual processing subtests (divided into early, intermediate, and late processing stages), (b) visual spatial processing subtests, and (c) control subtests. The subtests could be *matching* tasks, which required the child to choose the stimulus corresponding to a target from three possibilities; *naming* tasks, in which the child had to name the stimulus; or *binary decision* task, which required the child to classify the stimulus into two categories.

To target the processes of interest, the presentation of the items and the modality of responses were designed to reduce as much as possible the involvement of other cognitive processes such as working or long-term memory, praxis and motor skills, visual constructional aptitudes, and language abilities. In all tasks, no time limit was placed on the stimuli presentation so as to ensure that each child had sufficient time to

see all items presented on the screen and avoid memory-based responses. This methodological choice was made to use these subtests in comparative studies with children presenting different neuro-developmental pathologies. The use of large switches instead of a keyboard aimed to limit the involvement of motor and praxis functions. Testing only involved perceptual processing, thus avoided visual constructional skills. While the instructions were given in the form of short sentences, the examiner also touched the target and the stimuli on the screen to explain the purpose of the subtest. One point was given for each correct response.

A series of subtests was designed to examine the different processing levels of the pre-semantic stage described in Humphreys and Riddoch's model (Humphreys & Riddoch, 1987b). Table 3 reports the different tasks used to assess each processing level as well as those for visual spatial processing (15 in total).

Table 3.
Repartition of visual perceptual processing subtests according to Humphreys and Riddoch's model (1987) as well as visual spatial processing subtests.

Visual Perceptual Components			Visual Spatial Components
Early analysis	Intermediate analysis	Late analysis	Basic components
Surface	Overlapping figures	Object constancy	Location in a box
Length	Hierarchical figures	Object decision	Topology
Orientation	Incomplete figures	Object completion	Evaluation of distances
Position	White figures		
Detection of visual features			

Visual perceptual processing: Early analysis

The subtests examining the early level of analysis assessed the processing of local basic shape components and global features of the stimuli. Except for the detection of visual features, all other subtests in this early level of analysis (i.e., surface, length, orientation, position) were matching tasks inspired by the BORB (Humphreys & Riddoch, 1993). In each subtest, items varied according to three levels of difficulty, and within each level, the items were presented in increasing order of difficulty, with more and more subtle differences to be gradually perceived.

Surface

This subtest assessed the ability to estimate the surface area occupied by objects. Children were presented with four drawings of black silhouettes of everyday objects (one target and three possible answers) and asked to select one of the three silhouettes that corresponded to the target silhouette presented at the top of the screen (Fig. 2a). Items varied in terms of the percentage difference in surface area between the distractors and the target (from 1% to 15%). For each item, the percentage difference was equal for both distractors, with each one either over- or underestimating the surface of the target. Three items were presented for each percentage difference in surface area, with a total of 45 items in the whole task.

Length

This subtest assessed the ability to estimate the length of objects. Children were asked to select one of the three pencils that corresponded to the length of the target pencil (Fig. 2b). In half of the items, the pencils were placed horizontally, and in the other half, vertically. As their length did not vary locally at the pencil lead, the children had to analyze the length globally. Moreover, in the vertical presentation, the three pencils were aligned at their midpoint. Similarly to the surface subtest, items varied with regard to the percentage difference in the length between the distractor and the target (from 1% to 15%). For each item, the percentage difference in the length was equal for both distractors, with each one either over- or underestimating the target length. Three items were presented for each percentage difference in length, with a total of 45 items in the whole task.

Orientation

This subtest assessed the ability to understand the orientation of objects. Children were asked to select one of three paintbrushes that corresponded to the orientation of the target paintbrush presented at the top of the screen (Fig. 2c). The paintbrushes were placed horizontally, vertically, or in an oblique position ($\pm 45^\circ$ from the vertical axis). For each item, the two distractors were presented with either a clockwise or counterclockwise rotation of 1° , 3° , 5° , 7° , 9° , 11° , 13° , or 15° from the target position, with the amount of deviation being equal for both distractors. A total of 64 items were presented in this subtest, with eight items for each 1° rotation (two horizontal, two vertical, two oblique to the left, and two oblique to the right).

Position

This subtest assessed the ability to evaluate the relative position of objects. Children were presented with discs with a semi-circular opening. They were asked to select one of three discs that corresponded to the position of the target disc (Fig. 2d). The opening of the target was oriented horizontally for half of the trials (left/right counterbalanced) and vertically for the other half (top/down counterbalanced). For each item, the two distractors presented either a clockwise or counterclockwise rotation of 1° to 15° from the position of the target, with the amount of deviation being equal for both distractors. Four items were presented for each 1° rotation, with a total of 60 items in the whole task.

Detection of visual features

This subtest assessed the perception of line orientations as based on the protocol in the study of Ballaz, Boutsen, Peyrin, Humphreys, & Marendaz (2005). The subtest was divided into two detection tasks (Fig. 2e). Children had to decide (a) whether an oblique line was hidden among a set of vertical lines (oblique detection), and inversely, (b) whether a vertical line was presented among a set of oblique lines (vertical detection). The size of the display increased in complexity with three, six, and then nine lines. For each display size, 16 items were presented, with a total of 48 items in each of the two detection tasks.

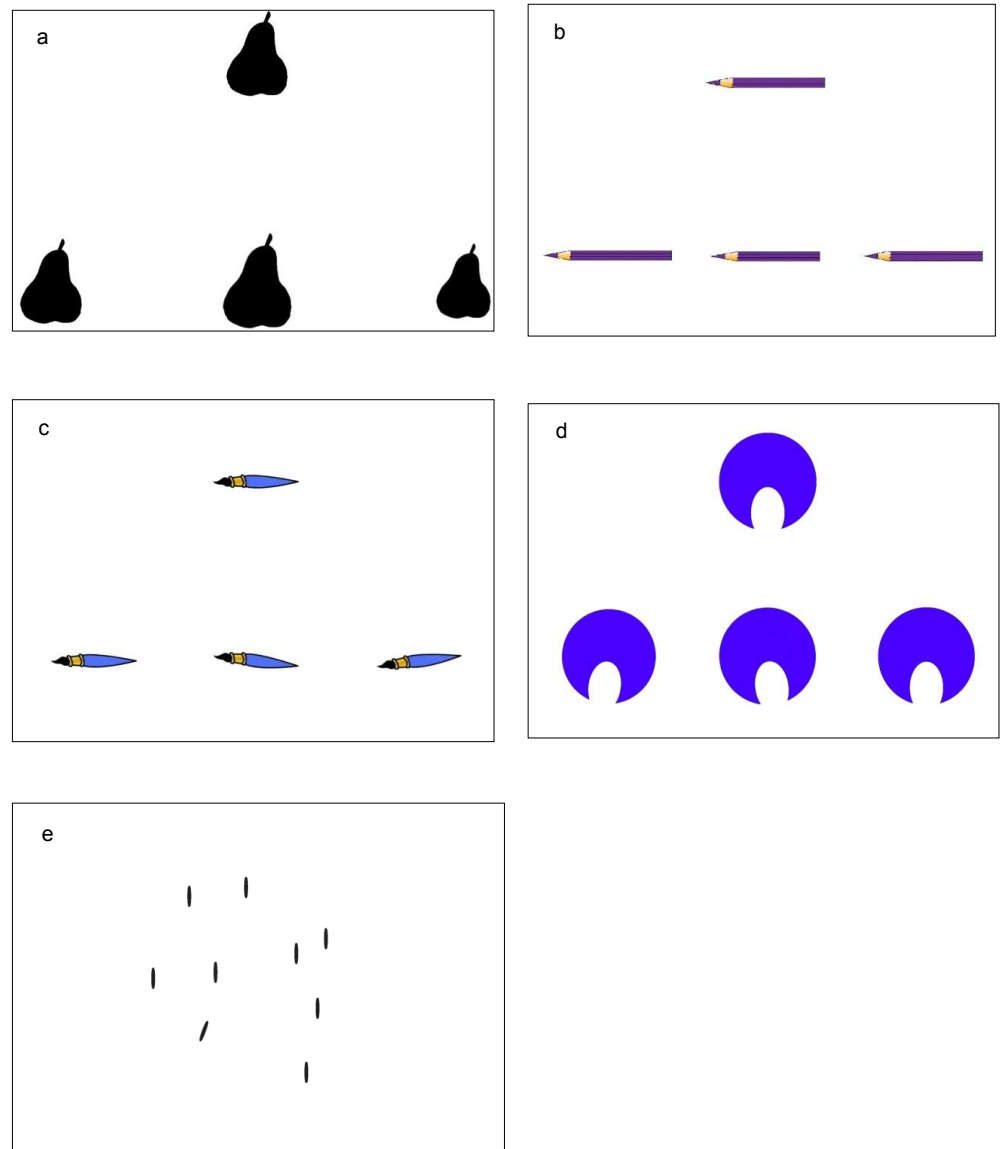


Figure 2. Examples of items found in the subtests for the early processing stage. (a) surface, (b) length, (c) orientation, (d) position, and (e) detection of visual features

Visual perceptual processing: Intermediate analysis

The subtests examining the intermediate level of analysis assessed a child's ability to integrate local and global traits into a view-dependent representation of an object. Four subtests were proposed to each participant: (a) overlapping figures to assess figure-ground discrimination abilities, (b) hierarchical figures to test local-global perceptual processing, (c) incomplete figures to assess visual closure on everyday objects, and (d) white figures to examine visual closure on geometrical shapes. In the overlapping and incomplete figures subtests, items belonged to four different semantic categories (utensils, furniture, clothing, and animals) and were selected based on the ability of a 5-year-old child to name the objects or animals. For each picture, the success rate was between 95% and 100% (Cannard et al., 2006).

Overlapping figures

This subtest assessed the ability to discriminate between figure and ground. Children were presented with two, three, or four overlapping black outline drawings on a white background and were asked to identify the overlapping figures. This subtest included two tasks administered in the following order: a naming task in which participants had to name the different objects (Fig. 3a) and a matching task in which participants had to identify among three pictures the one hidden in the overlapping figures (Fig. 3b). Each task consisted of 36 items. The naming task began with 12 items with fully overlapping figures, followed by 12 items with a partial overlap, and then 12 items with figures with no overlap but touching outline. For each overlapping level, children were first presented with two, three, and then four figures, each with four items. In the matching task, all items included fully overlapping figures with eight, twelve, and sixteen items for two, three, and four figures, respectively, presented in a counterbalanced order.

Hierarchical figures

This subtest, drawing from the study of Navon (1977), assessed the preferential perceptual processing strategy (global or local) used to identify forms. Children were presented with a series of basic shapes (local) arranged to form a geometric figure (global). The subtest was divided into two tasks in which children had to select one of three shapes corresponding to either the overall shape of the stimuli (global

identification task, see Fig. 3c) or the constitutive elements (e.g., crosses) (local identification task). Local and global identification tasks were administered in a counterbalanced order. Each task consisted of 30 items presented in random order; in half of the items, the local and global features referred to the same shape (e.g., a square made of squares), and in the other half, the local and global features corresponded to different shapes (e.g., a square made of triangles). Figures consisted of simple (rectangle, square, triangle, circle, and ellipse) and complex geometric shapes (diamond, star, cross, and hexagon).

Incomplete figures

Inspired by Bierdermann's work (1987), this subtest assessed the visual closure of objects, that is, the ability to form a coherent global perception based on an object's local features. Children were asked to recognize and name living and non-living objects depicted by a white image on a black background degraded by 50%. Again, this subtest was divided into two 30-item tasks: (a) one task presented white silhouettes (Fig. 3d) and (b) the other presented white outline drawings (Fig. 3e). These two tasks were administered in a counterbalanced order across participants. The image degradation was either in the middle of the drawing (for the easiest items), at the intersections, or on the prototypical parts. Each task started with 10 items degraded on the prototypical part, followed by the 10 items degraded at the intersections, and then the 10 items with the degradation in the middle.

White figures

This subtest assessed visual closure abilities on geometrical shapes. Children were presented with 10 simple white geometric figures surrounded by black shapes suggestive of the white figure's edges, as a variation of the Kanisza figures (1979). This subtest included two tasks administered in the following order: a naming task in which participants had to name the white shape and a matching task in which they had to select one of three shapes that corresponded to the target (Fig. 3f).

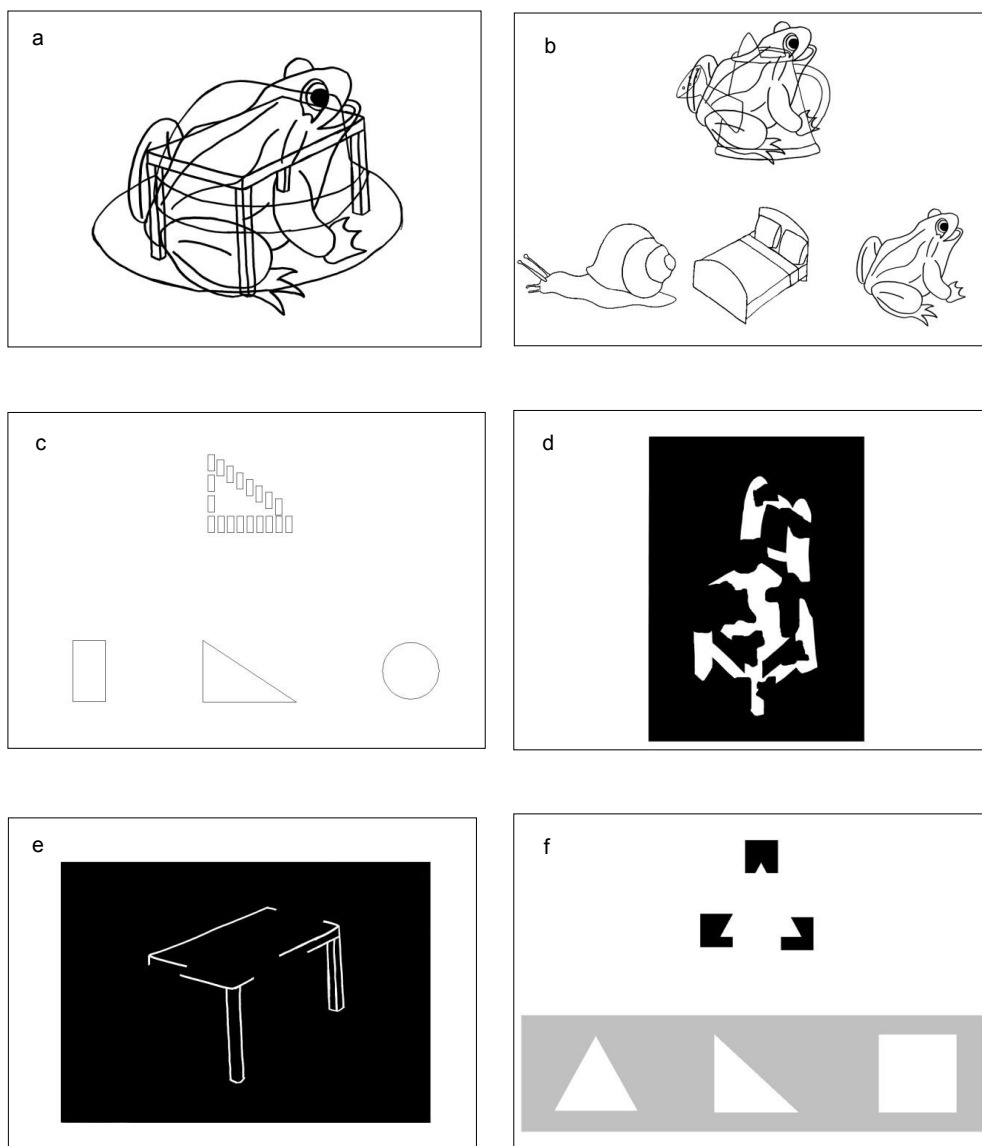


Figure 3. Examples of items found in the subtests for the intermediate processing stage. (a) naming task and (b) matching task from the overlapping figures subtest, (c) hierarchical figures subtest, (d) white silhouette task and (e) outline drawing task from the incomplete figures subtest, and (f) white figures subtest

Visual perceptual processing: Late analysis

Three subtests inspired from the BORB (Humphreys & Riddoch, 1993) were included to assess late analysis, namely object constancy, object decision, and object completion. These subtests examined the children's ability to form a view-independent perception of the object.

Object constancy

Object constancy is a matching task designed to assess the visual recognition of objects presented from an unconventional perspective. This subtest was divided into two distinct tasks: one with black outline drawings on a white background (Fig. 4a) and the other one with colored drawings. The two tasks were administered in a counterbalanced order across participants. Children were asked to select one of three possibilities that matched the target object presented from a different perspective. Correct answers represented the target object from nine possible perspectives (rotation of 45°, 90°, 135°, about turn, 225°, 270°, and 315° on the horizontal plane, and two vertical views from above and below). The distractors presented objects with a similar overall shape to the target. For each task, three items were presented for each rotation or view, with a total of 54 items.

Object decision

Object decision is a subtest designed to evaluate the access to the 3D-structural representation of the object based on known, physical characteristics. Children were presented with a series of black outline drawings presented on a white background and were asked to decide whether the presented object was real or not (Fig. 4b). A total of 32 items were presented in random order, with 16 items with living objects (e.g., owl, dog) and 16 with non-living objects (e.g., trousers, chair). In each category, half of the items were real objects presented from a prototypical perspective, while the other half were non-real objects created by assembling the parts of real objects.

Object completion

Object completion is a matching task assessing the ability to access the structural description of the object on the basis of its local parts. Children were presented with parts of an object and had to choose the missing parts of the target object from among three possibilities (Fig. 4c). The subtest included 10 items with living objects (e.g., owl, dog) and 10 items with non-living objects (e.g., trousers, chair) presented in random order, with a total of 20 items. The distractors consisted of parts of real objects presenting a similar global shape to the correct response.

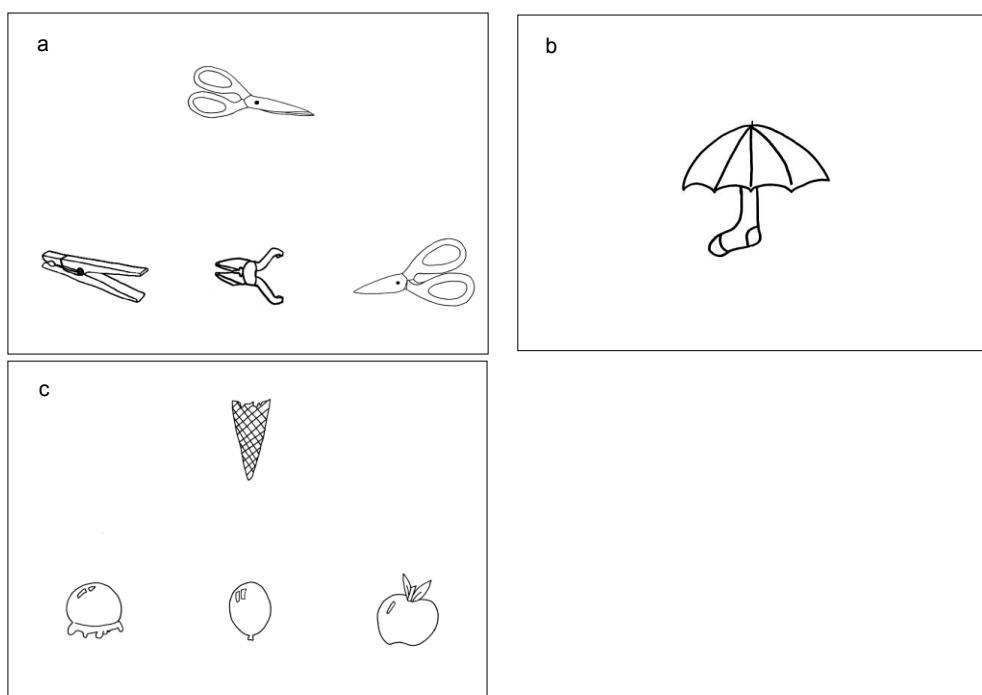


Figure 4. Examples of items found in the subtests for the late processing stage. (a) object constancy, (b) object decision, and (c) object completion

Visual spatial processing

Visual spatial processing was assessed in a series of three matching tasks, namely location in a box, topology, and evaluation of distances, which were designed to examine how children process spatial relationships.

Location in a box

Location in a box is a matching task designed to test the ability to determine the position of elements in an overall configuration. It was inspired by the block matching task of the L94 battery (Stiers et al., 2001). This subtest was divided into two distinct tasks: one had a grid within the frame and the other only a frame; both tasks included one, two, or three red squares. The two tasks were administered in a counterbalanced order across participants. Children were asked to select one of three possible frames with red squares located in the same position as the target (Fig. 5a). Among the three proposals, one was identical to the target, one presented the red squares in the same arrangement but in another position within the frame (displacement error), and one presented the red squares in a different arrangement with one square displaced to another position within the frame (distortion error). The size of the frame and the number of red squares were manipulated to create items of increasing difficulty presented in the following order: 16-cell frame (four items with one square and four items with two squares), 25-cell frame (10 items with two squares), 36-cell frame (10 items with two squares and 10 items with three), and 49-cell frame (10 items with two squares and 10 items with three), with 58 items per task for a total of 116 items.

Topology

Inspired by the DTVP II spatial relation test (Hammil et al., 1993), this subtest assessed the ability to discriminate topographical relationships between different interrelated elements. Children were presented with a square matrix in a regular arrangement of 9, 12, 16, 25, or 36 black dots. Within this arrangement, some of the dots (3 to 10 dots) were connected to each other by lines that formed a path (Fig. 5b). Children were asked to select the same arrangement as the target from among three possibilities (i.e., the same path located in the same position). Among the three proposals, one was

identical to the target, one presented the interconnected dots in the same arrangement but in another position within the matrix (displacement error), and one presented the interconnected dots in a different arrangement in which one dot was displaced by one position (distortion error). The size of the matrix and the number of interconnected dots were manipulated to create items of increasing difficulty administered in the following order: 9-dot matrix (four items with three interconnected dots), 12-dot matrix (four items with four interconnected dots), 16-dot matrix (four items with five interconnected dots followed by four items with six interconnected dots), 25-dot matrix (four items with seven interconnected dots followed by four items with eight interconnected dots), and 36-dots matrix (four items with nine interconnected dots followed by four items with ten interconnected dots), for a total of 32 items in the subtest.

Evaluation of distances

This subtest assessed the judgment of relative distances between elements in the child's environment and in a visual scene. Children were presented with photographs of Playmobil® figures (men, women, children, animals, and everyday objects) that depicted a daily life scene (Fig. 5c). The subtest was divided into two distinct tasks requiring the child to assess the distance using an egocentric or allocentric cue. These two tasks were administered in a counterbalanced order across participants. In the estimation of egocentric distance, the child had to choose the character closest to him from among three possible answers. In the evaluation of allocentric distance, the child had to identify the closest character to a target object. A distance of 3, 4, 5, 7, and 10 cm separated the characters from one another. The items were presented in an increasing order of difficulty, with items with larger distances being presented first (random presentation within each distance). For each task of the subtest, there were six items per distance, with a total of 60 items.

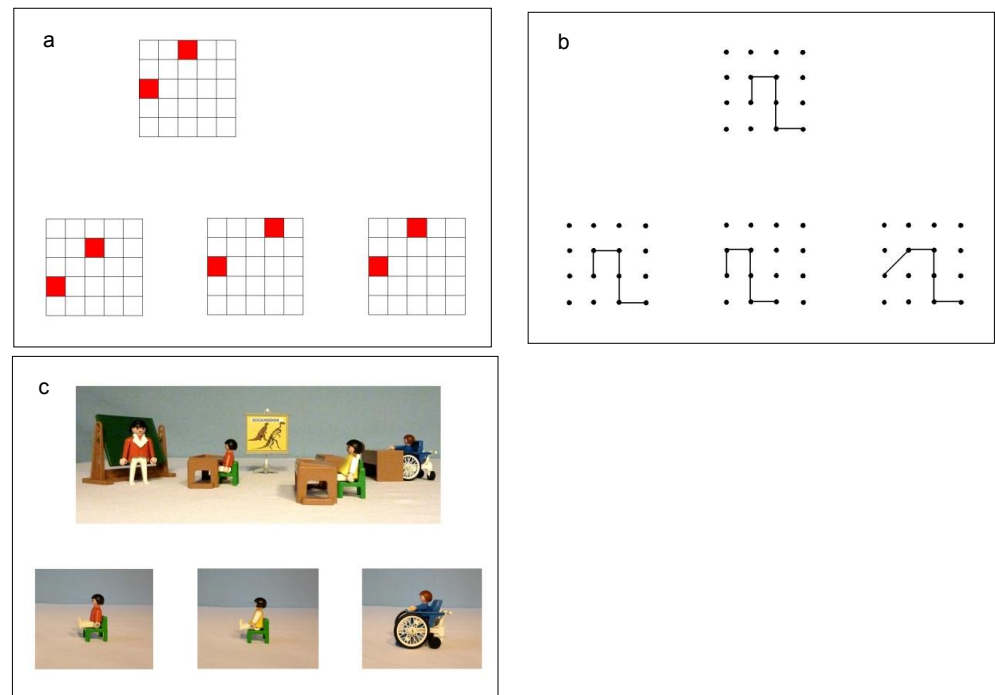


Figure 5. Examples of items found in the subtests for visual spatial analysis. (a) location in a box, (b) topology, and (c) evaluation of distances.

Control subtests

Two additional subtests were administered as a control task to measure the children's speed processing and naming abilities.

Reaction time

The reaction time subtest is a matching task used to measure the general processing speed required to provide a manual motor response using the switches, the matching skills, and to measure visual-attention abilities. These individual motor response latencies were used to control for inter-individual differences in general processing speed in the matching tasks. Children were presented with 24 colored geometric shapes (e.g., circle, arrow, rectangle, and cross) and were asked to select the identical stimuli from among three possibilities. The distractors were highly distinguishable from the targets as they differed in shape, size, and color to minimize perceptual processing.

As in the other matching tasks of the battery, stimuli were left in full view with no time limit.

Picture naming

In the picture-naming task, children were asked to name 45 black outline drawings of objects and animals presented in the battery. This was implemented to ensure that the children knew the names of the pictures used in the different subtests without any additional perceptual processing requirements.

Procedure

Children were tested individually in a quiet room. The administration of subtests was distributed over three to five sessions of 45 minutes maximum depending on the child's attention. The order of the subtests was counterbalanced across children with the exception of the two control subtests: reaction times was the first subtest administered to allow the children to become familiarized with the equipment, while picture naming was the final subtest. Each subtest started with two practice trials that presented the easiest items to ensure that children understood the instructions and requirements of the task. No feedback was provided during the test. Children answered in an autonomous manner, with the examiner only intervening in the case of technical problems or to recall the instructions if needed.

RESULTS

All computations were performed using Statistica 13 software (StatSoft France). Accuracy data did not fit a normal distribution, so percentages (P) of correct responses were subjected to a natural logarithm transformation using the formula $\text{LN} [P / (100 - P)]$. Despite this transformation, our data did not follow a normal distribution. Accordingly, data were analyzed using non parametric statistics each time when it was appropriate.

First, the selection of the most appropriate tasks is done by removing any that was considered too easy (ceiling effect analyses) or redundant (correlation analyses). Children were considered to perform at ceiling in tasks where they reached at least 95% of correct responses from the younger age groups. Percentages of correct responses of TD children in the 15 subtests of the battery are presented in Table 4.

Second, internal consistency was examined in each of the 12 remaining subtests using the Cronbach α coefficient to assess subtest reliability of the underlying processes.

Third, the theoretical validity of the battery was examined by exploring the latent factorial structure of the different subtests. It was analyzed using exploratory factor analysis with normal varimax rotation, which represents the best choice for our type of data because it maximizes the variance on the factors and provides a clear structure of the factor weights. This analysis aimed to determine whether the latent structure reflects the different processing levels of the Humphreys and Riddoch's model (1987a), and how the different subtests co-vary with the underlying latent factors.

Fourth, correlation analyses were performed to examine a possible correlation between the scores obtained on the Visual Perception subtest of the Beery-VMI (Beery et al., 2010) and the scores obtained on each of our subtests. This VP subtest allows the assessment of visual-perceptual matching abilities, and only requires identifying each item's identical match from a set of similar shapes with limited task motor requirements. Based on factorial analysis, a global score of performances for each of the three factors was computed. Correlation analyses were also performed to determine a possible correlation between the scores obtained on the VP and these global scores.

Lastly, non parametric Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were separately conducted for each factor on percentages of correct responses to assess the effect of Age (5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14). When statistically differences were detected, separate non-parametric Mann-Whitney with Bonferroni adjustments for multiple comparisons (with a significance level of 5%) were performed to determine performances differences between age groups.

Task Sensitivity

As depicted in Table 4, results showed the presence of a ceiling effect on the colored drawings task of the object constancy subtest and on some parts of the overlapping figures subtest (i.e., matching task; partially overlapping and touching items of the naming task). The detection of visual features subtest proved to be time-consuming to administer and unattractive for children, as they had difficulty maintaining their attention and completing this task (e.g., they frequently said that it was too long or it was not fun). Subsequently, these different tasks were removed from the battery.

Correlation analyses were used to examine whether some tasks were redundant. These analyses revealed significant positive correlations between the white silhouette drawing and outline drawing tasks in the incomplete figure subtest ($r = 0.52$, $p < .001$) and between the white silhouette drawing task of the incomplete figures subtest and the white figures subtest ($r = .56$, $p < .001$). Indeed, these tasks assessed the same processing (i.e., visual closure). Subsequently, the easiest correlated tasks were systematically removed as they proved to be less discriminating (i.e., outline drawing task of the incomplete figure subtest and the white figures subtest). The more difficult silhouette drawing task of the incomplete figures subtest was retained, as children's performances did not reach the ceiling level. Correlation analysis also revealed significant positive correlations between the location in a box and topology subtests ($r = 0.75$, $p < .001$). As these two subtests assessed the same processing (i.e., spatial localization), the easiest subtest (i.e., topology) was removed.

Table 4.

Descriptive statistics: Mean percentage of correct responses and standard deviation for each subtest according to the five age groups

<i>Visual perceptual processes</i>		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
<i>Early level</i>	Length	47.9	10.7	48.5	11.9	49.7	12.1	53.9	16.4	56	12.1
	Surface	57.7	13.2	62.5	11.9	65.2	10.8	68.8	9.8	65.6	11.8
	Orientation	60.5	11.5	69.2	8.2	70.4	10.9	75.4	6.5	73.8	10.7
	Position	70.1	10.8	76	13.9	80.4	10.5	84.4	7.8	83.9	6.1
	Detection of visual features	86.8	11.8	90.2	8.4	94.7	6.2	95.8	7.3	96.3	6.9
<i>Intermediate level</i>	Overlapping figures: complete	66	16.9	82.1	16.1	92.6	8.2	93.9	6.9	94.7	6
	Overlapping figures: partial	97	5.7	99.3	4.2	99.1	3.3	99.7	1.4	100	0
	Overlapping figures: touching	99.8	1.4	99.3	3.1	100	0	99.3	2.4	99.8	1.4
	Overlapping figures matching	96.9	4.3	98.3	2.3	98.4	3.1	99.5	1.3	98.7	2.3
	Hierarchical figures	85.9	15.9	91.1	9.7	95.4	6.3	96.8	5.6	97.7	4.7
	Incomplete figures: silhouettes	54	25.2	69.1	17	78.7	14.1	87.2	11.9	91	10.1
	Incomplete figures: outline	89.1	10.1	94.9	6.1	96.5	4.8	98.5	2.3	98.8	2.4
<i>Late level</i>	White figures	78.2	16.9	91.8	11.8	96.4	6.2	98.4	4.6	98.7	2.5
	Object constancy: outline	87.9	7.4	89.2	7	93.7	5.3	95.5	5.4	95.3	3.7
<i>Visual spatial processes</i>	Object constancy: colored	96.2	5.5	95.1	9	93.4	14.6	96.6	8.1	95.6	11.9
	Location in a box: grid	83.7	18.4	90.1	9.7	83.4	12.8	85.5	16	80.9	15.6
	Location in a box: no grid	83.5	14.9	88.4	8.8	83.7	12.5	84.4	15	79.6	17.5
	Topology	89.2	15.8	94.5	7.7	91.4	8.6	90.8	11.6	86.9	14.9
	Distances: egocentric	85.9	13.9	88.4	11.2	85.1	14.6	84.9	13.3	83.8	11.4
	Distances: allocentric	88.5	7.5	88.9	8	85.6	10	86.8	13.4	86.5	8.5

Note. All scores are significantly higher than chance ($ps < .05$), set at 33% because of the three response possibilities in each matching task. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses)

Internal consistency

The majority of subtests reached coefficients exceeding .80 (Table 5). These high reliability indexes suggest that the subtests are a reliable measure of the underlying processes with highly correlated items. Slightly lower reliability was observed in the length, surface, and overlapping figures (naming task) subtests, with coefficients ranging between .70 and .80, which are acceptable coefficients of internal consistency. No coefficient could be calculated for the object decision subtest, because it presented a near zero variance. For the object completion subtest, the coefficient of internal consistency reached only .59, which represents a low reliability measure. Such a low coefficient might indicate that the subtest items measure different latent variables, resulting in a lower correlation between items.

Table 5.
Coefficients of internal consistency (Cronbach alphas) for each subtest

Visual perceptual processes		α Cronbach coefficients
<i>Early level</i>	Length	.73
	Surface	.74
	Orientation	.80
	Position	.85
<i>Intermediate level</i>	Overlapping figures naming: complete	.79
	Hierarchical figures	.92
	Incomplete figures: silhouettes	.93
<i>Late level</i>	Object constancy: outline drawings	.82
	Object decision	/
	Object completion	.59
Visual spatial processes	Location in a box: grid	.93
	Location in a box: no grid	.92
	Distances: egocentric	.85
	Distances: allocentric	.81

Theoretical validity

Exploratory factor analysis conducted on the remaining 12 subtests with developmental data yielded three factors that explained 56.78% of the model's variance. The output factors did not reflect the structure proposed in Humphreys and Riddoch's model.

As shown in Table 6, the four subtests of early analysis (length, surface, position, and orientation) loaded on Factor 1 (early analysis), which captured 16% of the variance. Factor 2 (intermediate and late analyses) explained 21.62% of the variance and regrouped six subtests which respectively assess the ability to form a view-dependent and -independent representation of the object, and to access to the structural representation of the object: the three subtests in the intermediate analysis, namely, hierarchical figures, overlapping figures (completely overlapping items of the naming task), and incomplete figures (white silhouettes drawing task), and the three subtests in the late analysis, namely object constancy (outline drawing task), object completion, and object decision subtests. Finally, the two subtests assessing basic spatial dimensions of visual perception, namely location in a box (with and without grid tasks) and evaluation of distances (egocentric and allocentric tasks), loaded on Factor 3 (spatial analysis), which explains 19.16% of the variance.

Table 6.

Factor loading for exploratory factor analysis of BEVPS subtests.

	Factor 1 (features processing)	Factor 2 (object processing)	Factor 3 (Spatial analysis)
Length	.76	.04	.03
Surface	.73	.30	.01
Orientation	.71	.34	.00
Position	.51	.40	-.08
Hierarchical figures	-.05	.76	.06
Object constancy: outline drawings	.17	.74	.03
Overlapping figures naming	.27	.72	.00
Incomplete figures: silhouettes	.34	.66	.04
Object completion	.28	.54	-.14
Object decision	.11	.50	.13
Location in a box: grid	-.08	-.09	.90
Location in a box: no grid	.11	-.07	.87
Distances: egocentric	.01	-.02	.80
Distances: allocentric	-.18	.05	.65

Note. Factor loadings >.50 are in boldface. We applied a normal varimax rotation to raw data to maximize the variance on the factors and obtain a clear structure of the factor weights.

Convergent validity

Table 7 shows the significant positive correlations between the VP and the tasks assessing visual perceptual processing, except for the object decision subtest ($r = .21$, $p > .05$). Subtests assessing basic visual spatial processing did not show any significant correlations with the VP. Table 7 also shows the significant positive correlations between Factor 1 and VP scores ($r = .52$, $p < .05$), and between Factor 2 and VP scores ($r = .57$, $p < .05$), but no significant correlation between Factor 3 and VP scores ($r = -.04$, $p > .05$).

Table 7.

Coefficients of correlations between the VP subtest of the Beery-VMI and our different subtests and factors

Visual perceptual processes		Visual perception subtest Beery-VMI
<i>Early level</i>	Factor 1	.52
	Length	.32
	Surface	.41
	Orientation	.46
	Position	.40
<i>Intermediate level</i>	Factor 2	.57
	Overlapping figures naming: complete	.45
	Hierarchical figures	.37
	Incomplete figures: silhouettes	.46
<i>Late level</i>	Object constancy: outline drawings	.43
	Object decision	.21 ns
	Object completion	.40
Visual spatial processes	Factor 3	-.04 ns
	Location in a box: grid	.00 ns
	Location in a box: no grid	.06 ns
	Distances: egocentric	.04 ns
	Distances: allocentric	.02 ns

Note. ns means that the coefficient of correlation is not significant at a 95% confidence level

Developmental trajectories

As shown in Figure 6, nonparametric Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were separately conducted for each factor on percentages of correct responses, and revealed that Factors 1 and 2 showed a significant increase in performance across ages (5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14), $H(4) = 37.63$, $p < .001$, and $H(4) = 100.59$, $p < .001$, respectively. Factor 3 did not show any significant increase in performance across age, $H(4) = 6.31$, $p > .05$. More specifically, in Factor 2, the effect of age was computed separately for the subtests loading to intermediate and late levels of analysis, to compare their two developmental curves, and to be sure that no great age discrepancy was present between the construction of view-dependent and -independent object representation, which are clearly separate in adult literature. These two levels showed a significant increase in performance with age, $H(4) = 88.16$, $p < .001$, and $H(4) = 66.53$, $p < .001$, respectively. Factor 1 showed a significant improvement in the performances of children aged between 5-6 and 9-10 years, 11-12 years, 13-14 years ($ps < .001$), and between 7-8 and 11-12 years ($p < .002$), 13-14 years ($p < .006$). Children's performances also vary according to age in Factor 2 (global) for view-dependent object recognition: 5-6 years < 7-8 years < 9-10 years < 11-12 years = 13-14 years ($ps < .001$); as well as view-independent object recognition: 5-6 years = 7-8 years < 9-10 years = 11-12 years = 13-14 years ($ps < .001$).

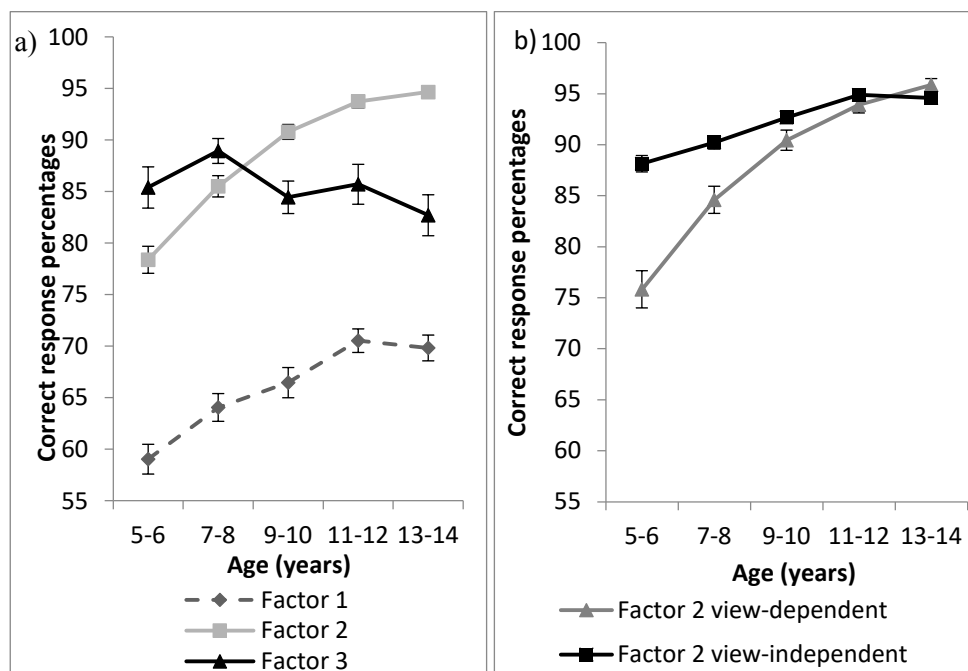


Figure 6. Correct response percentages presented by (a) factor and (b) view type in factor 2. Error bars represent standard error of the mean.

DISCUSSION

The present study aimed to assess the different processing levels of the pre-semantic stage of Humphreys and Riddoch's model as well as basic visual spatial abilities in the same sample of TD children. Therefore, 15 subtests were created and administered to 179 children aged between 5 and 14 years 11 months who were divided into five age groups. The most relevant tasks were selected by excluding subtests or tasks with a ceiling effect (over 95% of correct answers) in younger children as well as tasks that were too long or redundant in comparison with other tasks (i.e., assessing the same visual perceptual or spatial process).

The final battery of tests therefore includes ten subtests for visual perceptual assessment and two subtests for visual spatial assessment after the elimination of 30% of the total amount of items found in the original battery. Using an exploratory factorial analysis, results showed that the 12 remaining subtests are organized into three latent factors.

Factor 1 accounts for the variance of four subtests (length, surface, orientation, and position), and shows satisfactory to very good coefficients of internal consistency. In accordance with Humphreys and Riddoch's model, these subtests assess the early level of visual perceptual processing, allowing for the analysis of basic shape components and the coding of local and global parts of an object.

Factor 2 accounts for a large part of the variance and includes six subtests. Unlike Humphreys and Riddoch's model, the subtests assessing the intermediate and late levels of visual perception processing were regrouped under the same factor. As expected, this includes three subtests (incomplete figures, overlapping figures, and hierarchical figures) that correspond to the intermediate processing level and relate to the ability to integrate local and global traits into a view-dependent recognition of an object.

Unexpectedly, however, this factor also included three subtests (object constancy, object decision, and object completion) corresponding to the late processing levels, which allows an object to be recognized from a view-independent representation through prototypical representations stored in long term memory (Humphreys & Riddoch, 2006; Peissig & Tarr, 2007).

One possible explanation for the division of our visual perceptual subtests into only two latent factors could relate to the nature of the perceptual processing demand. In subtests loading on Factor 1, the child is requested to process a single characteristic of simple shapes and lines that could be performed by processing local (e.g.; length) or global (e.g.; surface) information about the stimuli. By contrast, the subtests loading on Factor 2 consisted of objects presented in different conditions (e.g., overlapping) and from different viewpoints (e.g., unconventional perspective), which demand the analysis and integration of both local and global information. Thus, we could assume that the subtests loading on Factor 1 involve the visual analysis and coding of basic local details or simple shapes, while the subtests loading on Factor 2 involve integrative and

transformative visual perceptual processes that allow the object to be recognized based on view-dependent or -independent representations. This could explain why our results did not distinguish between these different processing levels as in Humphreys and Riddoch's model.

It is worth noting that various studies of visual object recognition in children do not reveal any hierarchical structure between the different visual perceptual processes, questioning both the independence of visual perceptual processing, and the relevance of such an organization in children (Barca, Cappelli, et al., 2010; Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007; Chokron et al., 2010; Stiers et al., 2001). In contrast, our results brought evidences supporting the organization of visual perceptual processes in at least two factors, the first devoted to the analysis of basic features of objects and the second devoted to view-dependent and view-independent representations of objects.

Nevertheless, in a developmental perspective, future studies are needed to examine whether the dissociation between intermediate and late visual perceptual processing is an emerging property in older children and whether the different processing levels could be dissociated in children with visual perceptual deficits as reported in clinical and non-clinical adult populations (Humphreys & Riddoch, 1987b, 2006; Riddoch et al., 2008; Rumiati et al., 1994). Finally, all subtests of Factor 2 showed good to very good internal consistency, except the object completion subtest, which presented low reliability, and the object decision subtest, for which this coefficient could not be calculated. This suggested that the items of these two subtests do not correlate with each other and might instead rely on different underlying constructs. In particular, living and non-living objects were presented in these subtests based on a semantic distinction that is usually made in the literature. In this respect, Merten (2006) found that the recognition of these two categories of items is only moderately correlated in brain-injured patients. This led us to question the relevance of including these items in a single measure, as they might depend on distinct cognitive processes.

As expected, the two subtests assessing visual spatial processing load separately on Factor 3, namely the evaluation of distances (egocentric and allocentric cues) and the location in a box (with and without a grid). These two subtests present good and excellent internal consistency, respectively. Such results indicate that these coefficients

provide reliable measures of the underlying processes, including items that were closely related as a group.

Moreover, correlation analyses revealed significant positive correlations between the VP subtest of the Beery-VMI and all tasks assessing visual perceptual processes loading on Factors 1 and 2 (except for the object decision task), but no such correlations between the VP subtest and tasks assessing visual spatial processes loading on Factor 3. Therefore, our visual perceptual tasks seem to effectively assess visual perceptual processing, as does the VP subtest of the Beery-VMI. The absence of any correlation between visual perceptual and spatial tasks, and between visual spatial tasks and the VP, confirms the division of tasks in different processing abilities: on the one hand, visual perceptual processing, and on the other, visual spatial processing. This dissociation between visual perceptual and spatial processes is consistent with the two visual pathways, vision for perception which allows recognition and identification of objects, people and natural scenes and depends on ventral, occipito-temporal pathway. While, vision for action allows visual guidance of actions through analyses of visual spatial information, and visual motor planning, and depends on dorsal, occipito-parietal pathway (Milner & Goodale, 2008).

Regarding the development of visual perceptual and spatial processing abilities, our results showed distinct developmental trajectories between the three factors, each showing specific age-related changes. These results bring further support to the developmental separation of the underlying processing. In Factor 1, children's performances improved significantly until 8 years, similarly to the results of Pisella's study (2013). These performances slightly improved between the ages of 9 and 14 years, but barely reached a correct response rate of 70%, suggesting that these processes could still develop in later childhood and adolescence. However, the different subtests loading to the early processing stage do not seem to follow the same developmental pathways. Pisella (2013) reported a significant improvement in performances for length and surface judgment tasks until 8 years, but until adulthood for the orientation judgment task. In contrast to this long-term development of a single basic perceptual characteristic (e.g. length, surface, orientation), the literature reported that the discrimination of simple shapes or drawings (processing at least two basic perceptual characteristics at the same time) was already mature by the age of 6 years (Bova et al., 2007; Stiers et al., 2001).

In Factor 2, performances significantly improved from 5-6 years, reaching the ceiling level (over 95% of correct answers) at 11-12 years. However, further analyses showed different developmental pathways in the performances of the intermediate processing stage (view-dependent object recognition) and late processing stage (view-independent object recognition). It would appear that the intermediate stage develops earlier, as our 5- to 6-year-old children responded correctly to 88% of items, compared to 75% of items in the late stage. However, from the age of 9-10 years, both types of processes develop in parallel, reaching 95% of correct answers at the age of 11-12 years. Similarly, Bova et al. (2007) showed a significant improvement in intermediate processing task between the ages of 6 and 11 years. Yet the author also specified that the performances on some subtests (e.g., recognition of incomplete figures) still improved after the age of 11 years.

Our results are in accordance with several studies reporting the early development of late perceptual processing in relation to view-independent object representation (Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007; Stiers et al., 2001).

Regarding the subtests of Factor 3, the performances did not improve with age, but already showed an 85% correct response rate by the age of 5-6 years. This could mean that first levels of difficulty of our tasks were too easy, even for younger children, or this could mean that basic visual spatial processes (e.g., spatial location) develop early, as also suggested by Bezrukikh & Terebova (2009). Nevertheless, Pisella's study (2013) suggested the long-term development of visual spatial processes between the ages of 4 and 12 years. Further research should consider separate analysis of the four specific tasks included in Factor 3 in order to provide a more precise developmental trajectory of visual spatial processing abilities.

In summary, our results showed that the various visual perceptual and spatial processes are divided into three factors, two loading to visual perceptual processes and one to visual spatial processes. This repartition fit with the two visual pathways, the ventral pathway for vision-for-perception, and the dorsal pathway for vision-for-action, separating object recognition and spatial analysis to guide movements. Moreover, in the visual perceptual processes, the distinction between early (basic visual features), and intermediate/late analyses (view-dependent and –independent representations of objects) could also fit with the Feature Integration Theory of Treisman (1980). This

theory, mainly concerned by visual attentional skills, distinguished the detection of basic visual features and their processing through different integrative processes (e.g. figure-ground segregation and features grouping), but do not allow to distinguish the different processes in each, detection and integration processes, and do not consider late analysis processes such as in the Humphreys and Riddoch (1987) model.

Our results also showed that these visual perceptual and spatial processes follow separate developmental courses. To the best of our knowledge, no study in children has provided a systematic assessment of the different visual perceptual and spatial processes in the same sample of children. Furthermore, as seen in the introduction (Table 1), the majority of studies use a limited number of tasks, which could also explain the discrepancies in the results between these studies and our own.

More studies are needed with a larger population of children for each age group in order to confirm the present results; the division of visual perceptual and spatial processing in three distinct factors, two devoted for visual perceptual processes which progress with age, and one for visual spatial processes which do not progress with age. An important issue to address will be to examine how tasks parameters (i.e., semantic categories, response type), and item difficulty (i.e., number of targets, positions of the items, perceptual threshold for a difference to be perceived) influence children's performances. Future studies should also consider the older children and adult population to provide a more precise developmental trajectory of visual perceptual processing abilities and specify their relation to basic visual spatial processing in terms of object recognition.

Finally, the use of the Battery for the Evaluation of Visual Perceptual and Spatial processing (BEVPS) in children and adults with visual perceptual deficits should examine the sensitivity of this battery for the detection of a specific processing deficit, which could open up the perspective for developing an adapted intervention program. As the involvement of praxis, motor, and language functions is strictly limited in this test battery, this new tool could be used to assess visual perceptual deficits in children with neuro-developmental pathologies such as Cerebral Palsy, associated with cognitive or motor disabilities.

However, at the present time and in the absence of a tests battery available for the specific assessment of the different levels of visual perceptual and spatial processing in children, these processes must therefore be assessed using subtests from different batteries such as the DTVP II or the TVPS 3. From a clinical point of view, the distinction between the different processing levels provide relevant information to specify the child profile through qualitative analyses and observations of their performances and the strategies used during the different tasks. In fact, visual perceptual disorders will have a negative effect on other visual cognitive processes requiring prior object recognition. It is therefore necessary to distinguish between the various possible causes of impairments in visual spatial, visual motor and visual constructive tests. Such distinction is essential for implementing individual-based intervention strategies for children.

**BASIC VISUAL PERCEPTUAL
PROCESSES IN CHILDREN WITH
TYPICAL DEVELOPMENT AND
CEREBRAL PALSY: THE
PROCESSING OF SURFACE,
LENGTH, ORIENTATION AND
POSITION.**

Schmetz E , Magis D, Barisnikov K , Detraux JJ , Rousselle L

Submitted in Child Neuropsychology in October 2017 (under revision)

Abstract

The present study aims to assess how the processing of basic visual perceptual components (length, surface, orientation and position) develops in typically developing children (n=215, 4 to 14 years old) and adults (n=20, 20 to 25 years old), and in children with Cerebral Palsy (CP) (n=86, 5 to 14 years old) using the first four subtests of the Battery for the Evaluation of Visual Perceptual and Spatial processing in children (BEVPS). Experiment 1 showed that these four basic visual perceptual processes follow distinct developmental trajectories in typical development. Experiment 2 revealed that children with CP present global and persistent deficits for the processing of basic visual perceptual components when compared with TD children matched on chronological age and nonverbal reasoning abilities.

Key-words: child, development, cerebral palsy, visual perceptual processes, length, surface, orientation, position

INTRODUCTION

Visual perception refers to the processes involved in the detection and recognition of visual information (Dutton, Lueck, 2015). The critical role played by visual perception in the development of cognitive abilities, as well as academic and social skills has been continually highlighted in recent work (Chokron, 2015; Chokron, Cavézian, & de Agostini, 2010; Dutton, Lueck, 2015). Visual perception has important implications not only for reading (e.g., recognition and grouping of letters, attention to the entire reading area, visual tracking lines), and writing (e.g., visual-manual coordination essential for any graphic activity), but also for arithmetic (e.g., comparison of quantities, counting, written calculation), geometry (e.g., copying geometric figures), and data processing (e.g., analysis of crosstabs). It is also central to the development of social skills, in which visual processing is required to detect visual social cues so as to adapt speech and behavior accordingly (Dutton, 2015; Lueck, 2015; Mazeau, 1995).

Currently, we still have limited understanding of the visual perceptual processes underlying the development of such complex visual cognitive abilities during childhood. Indeed, the bulk of our knowledge about the cognitive organization of visual perceptual processing stems from researches conducted with adults. This paper will address this gap in the literature by using Humphreys and Riddoch's (1987b) model to determine developmental trajectories in typically developing children, as well as the specific deficits presented in a CP population.

Two processing stages lead to the visual recognition of objects, according to Humphreys and Riddoch's (1987b) model. The first, known as the *perceptual* stage, enables the construction of a correct percept of an object based on visual input. The second, known as the *associative* stage, allows the elaborated percept to be associated with semantic and functional knowledge about objects. Although this model also includes an intermediate and late level of analysis, this paper will focus on the perceptual stage of the model and, more specifically, on the processing of basic visual perceptual components, which support the processing and the extraction of basic shape components. These components are the length, the size, the orientation, and the position of visual elements. Previously, these components have been assessed in healthy and brain-damaged adults using the Birmingham Object Recognition Battery

(Humphreys & Riddoch, 1993), whose structure was based on the aforementioned Humphreys and Riddoch's model (1987b). This tool has provided robust evidence of different types of visual agnosias in adults (Humphreys and Riddoch 1987, 2006, 2008).

By contrast, very few studies have explored the developmental course of basic visual perceptual processing in typical developing (TD) children. To our knowledge, the typical development of length and size processing has been explored only in a single study, which found that the processing of these basic visual perceptual components reached maturity by the age of 8 years (Pisella et al., 2013). In a recent work, Schmetz, et al. (2017) showed that a global score based on the four basic visual perceptual components, combined in a global score, developed significantly until 9-10 years of age, after which there is no longer any difference in children's performances. While this developmental threshold of 9-10 years is a significant finding, as yet no study has provided a systematic exploration of the development of the different basic visual perceptual components involved in visual recognition, one by one (Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007). The only basic visual processing component that has received special attention is the perception of orientation which improves significantly from the age of 3 until adulthood (Palomares, Landau, & Egeth, 2009).

The dearth of knowledge on the typical development of visual perceptual component is partly owed to the fact that the vast majority of studies examining this have been conducted in children with neuro-developmental disabilities, with TD children being included as control group (Joy & Brunsdon, 2002; Stiers et al., 2001; Swain, Joy, Bakker, Shores, & West, 2009). Research into the processing of length, surface, orientation, or position has also been undertaken in a small number of studies with clinical populations such as very premature children (Butcher et al., 2012; O'Reilly et al., 2010), children with cerebral palsy (Pueyo et al., 2009), children with spina-bifida (Swain et al., 2009), children with visual agnosia (Joy & Brunsdon, 2002), and children with genetic syndrome such as Williams syndrome (Bellugi, Lichtenberger, Jones, Lai, & George, 2000; Thibaut & Fayasse, 2009; Wang, Doherty, Rourke, & Bellugi, 1995). All these studies converge to indicate that the processing of basic visual perceptual components are highly vulnerable to neuro-developmental disorders. These studies

also attest the presence of very early deficits in basic visual perceptual processes, which could account for the global perceptual impairments frequently found in these patients.

Among neuro-developmental pathologies, children with Cerebral Palsy (CP) are particularly prone to visual-perceptual disorders. CP can be defined as permanent disorders of the development of movement and posture, caused by a non-progressive lesion of the brain occurring early in life. CP is often accompanied by intellectual disability, hearing and visual deficits, cognitive alterations and epilepsy (Rosenbaum et al., 2007). Children with CP frequently show deficits of perception and integration of visual information (i.e. line orientations, forms and letter recognition). Resulting in many difficulties in daily life, academic achievement, and visual-spatial impairments of space representations, mental imagery and visual-construction abilities (Fazzi et al., 2009; Koeda et al., 1997; Mazeau, 1995; Stiers et al., 2002), for example. The visual-perceptual impairments of these children are known to increase during development as a result of their visual and motor experiences providing them inappropriate visual input.

Although, visual perceptual (VP) disorders are well documented in children with CP, the origins and the nature of these disorders have been little described. Many studies have reported lower visual-perceptual abilities in children with CP (Fazzi et al., 2004, 2007, 2009; Kozeis et al., 2007; Pagliano et al., 2007; Stiers, De Cock, & Vandenbussche, 1999; Stiers et al., 2002; Tsai, Lin, Liao, & Hsieh, 2009; van den Hout et al., 2004). However, these studies based their conclusions on global scores and therefore offered no means of determining which specific visual perceptual processes are impaired. Furthermore, a large number of studies have been devoted to integrative visual perceptual processing such as visual closure, figure-ground discrimination and local-global processing but not to the examination of the processing of basic visual perceptual components. Using the Test of Visual-Perceptual Skills, Menken (1987) found that children with CP (9 to 12 years, $n=24$) performed significantly lower than TD children matched on chronological age ($n=24$) when they were asked to discriminate simple forms. Unfortunately, the processing of each of the four basic components was not examined separately. To best of our knowledge, only one study has analyzed an individual component - the ability to process orientation - in patients ($n=40$) with CP (6

to 38 years; Pueyo, Junqué, Vendrell, Narberhaus, & Segarra, 2009). They demonstrated deficits in 89.7% of the CP group, but these results varied according to the type of motor disorders in the following proportions: 50% deficit in dyskinesia, 88.9% in mixed form and 100% deficit in spasticity.

The differential deficits displayed across the CP group in the Pueyo et al. (2009) study highlight that several factors influence the perception of basic visual traits. For example, using the judgment line orientation judgment task (JLOT, (Benton, Hamsher, Varney, & Spreen, 1983), Palomares et al. (2009) showed that the initial orientation (vertical, horizontal, oblique) of the items influences the perceptual threshold at which participants perceive the difference between the presented lines. Furthermore, this manipulation can dramatically influence the conclusions that may be drawn from the results obtained. In very premature children for example, one study found no difference between very preterm (gestational age < 33 weeks) and full term children matched on chronological age on accuracy measures in the JLOT (O'Reilly et al., 2010). While another study (Butcher et al., 2012), found significant group differences for easy and medium levels of difficulty (27° and 18° of differences between the two target lines). Very different conclusion can thus be drawn depending on the manipulations of levels of difficulty of the items.

To sum up, little is known about how the processing of basic visual perceptual components develops in TD and CP children. Most of the studies that have investigated these processes in TD children have been conducted to examine the nature of visual perceptual deficit in neuro-developmental pathologies without specifying typical developmental trajectories. Moreover, among the studies that have explored the processing of basic visual perceptual components, the tests used do not allow the systematic assessment of each individual component. Furthermore, many of the abovementioned studies did not manipulate the factors that can influence the outcome of basic visual perceptual processing. In fact, only Butcher' study (2012), including both reaction times and accuracy measures, examine the efficiency of the processing at work in two distinct ways: the accuracy and the response speed, which could be separately impaired.

Considering the above, the present study aims to examine the developmental trajectory of basic visual perceptual processes. Accordingly, two experiments will be conducted to

assess the developmental trajectory of length, surface, orientation and position processing in typically developing children (Experiment 1) and children with CP (Experiment 2). In each task, the level of difficulty will be manipulated to avoid floor and ceiling effect in one or the other population of children.

EXPERIMENT 1

In experiment 1, we aimed to examine the typical development of the four basic visual perceptual processes from child to adulthood to assess if the processing of length, surface, orientation, and position reach maturity at the same pace or if they follow independent developmental trajectories.

Methods

Participants

Study participants included 215 TD children aged 4 to 14 year-old and 20 adults aged between 20 and 25 years (see Table 1). Participants were recruited from the Walloon Region (Belgium) through adverts. They were predominantly Caucasian and from middle to high socioeconomic status. The experimental protocol was set up in compliance with the Declaration of Helsinki, and in accordance with the SRCD ethical standards in research. It was approved by the ethical committee of the Faculty of Psychology (University of Liège). Informed consent was obtained from the children and their parents, and from the adult participants. The selection of participants was subject to the following exclusion criteria: the presence of a neuro-developmental disorder (including Cerebral Visual Impairment) or a medical pathology resulting in school absenteeism, the repetition of a grade in school, a learning disability or an uncorrected eye disorder. Children included in the sample were drawn from primary school or secondary school (only the first two years). Among the adult participants, ten had completed their secondary education diploma and the other ten adults had reached a higher level of education. All participants were native French-speakers. All the developmental and medical data were collected by a questionnaire filled in either by the children's legal tutor or by the adult participant himself.

Table 1.

Distribution of typically developing children and adults.

Ages	<i>n</i> (female-male)	Mean ages [min; max]
4 years	15 (7-8)	4 years 6 months [4 years 1 month - 4 years 11 months]
5-6 years	39 (19-20)	5 years 11 months [5 years – 6 years 11 months]
7-8 years	39 (19-20)	7 years 11 months [7 years – 8 years 11 months]
9-10 years	38 (19-19)	9 years 10 months [9 years – 10 years 11 months]
11-12 years	40 (20-20)	12 years 0 months [11 years – 12 years 11 months]
13-14 years	40 (20-20)	14 years 0 months [13years – 14 years 11 months]
Adults	20 (10-10)	21 years 4 months [20 years – 25 years]

Apparatus

Subtests were administered using a laptop with a 15.6-inch screen. Before presenting each item, a screen appeared with a central fixed point for duration of 1200ms. Responses were recorded using the Superlab © 4.5 software (Cedrus Corporation, San Pedro– USA). To respond, the participant had to press one of the three colored switches, which were laid out as yellow on the left, blue in the middle and red on the right. Each switch measured 6 cm in diameter and was embedded in a wooden support and placed on the table in the front of the laptop.

Materials

Four subtests were used to specifically assess the processing of the surface, the length, the orientation and the position of the stimuli. They were drawn from the *Battery for the Evaluation of Visual-Perceptual and Spatial* processing in children (BEVPS) which was designed to assess the different levels of visual-perceptual and visual-spatial processing in children (Schmetz, et al, 2017). All subtests matched tasks are inspired by the BORB battery (Humphreys & Riddoch, 1993). In each task, items varied according three levels of difficulty, and within each level, the items were presented in increasing order of difficulty, with progressively subtler differences to be perceived. One point was given for each correct response. Response latencies were recorded in milliseconds as median reaction times. Examples of the subtests are presented in Appendix A.

Length

This subtest assessed the ability to estimate the length of visual stimuli. Children were asked to select which one of the three pencils that corresponded to the length of the target pencil. As their length did not vary locally at the pencil lead, the child had to analyze the length globally. In half of the items, the pencils were placed vertically and in the other half horizontally. Moreover, in the vertical presentation, the three pencils were aligned at their midpoint. Items varied with regard to the percentage difference in the length between the distractors and the target (from 15% to 1%) which were distributed as follows: 11 to 15% difference from the target in easy trials, 6 to 10% difference for medium trials and 1 to 5% difference for hard trials. For each item, the percentage difference was equal for both distractors, with each one either over- or underestimating the length of the target. Fifteen items were presented for each difficulty level, with a total of 45 items in the whole task.

Surface

This subtest assessed the ability to estimate the surface area occupied by objects. Children were presented with four drawings showing black silhouettes of everyday objects (one target and three possible answers) and asked to select which one of the three silhouettes corresponded to the target silhouette presented at the top of the screen. Items varied in terms of the percentage difference in surface area between the distractors and the target (from 15% to 1%). The differences were distributed as follows: 11 to 15% difference from the target in easy trials, 6 to 10% difference for medium trials and 1 to 5% difference for hard trials. For each item, the percentage difference was equal for both distractors, with each one either over- or underestimating the surface of the target. Forty-five items were presented in this subtest, with 15 items for each level of difficulty.

Orientation

This subtest assessed the ability to appreciate the orientation of objects. Children were asked to select one of three paintbrushes that corresponded to the orientation of the target paintbrush presented at the top of the screen. The paintbrushes were placed either vertically, horizontally or in an oblique position ($\pm 45^\circ$ from the vertical axis). For

each item, the two distractors were presented with either a clockwise or counterclockwise rotation of 1°, 3°, 5°, 7°, 9°, 11°, 13° or 15° from the target position, with the amount of deviation being equal for both distractors. Eight items were presented for each rotation (two horizontal, two vertical, two oblique right and two oblique left). The resulting 64 trials were divided in three difficulty levels on the basis of the degree of orientation difference between the distractor and the target, which were distributed as follow: 11 to 15° difference from the target for easy trials (24 items), 6 to 10° difference for medium trials (16 items) and 1 to 5° difference for hard level (24 items).

Position

This subtest assessed the ability to evaluate the relative position of objects. Children were presented with discs which had a semi-circular opening. They were asked to select one of three discs that corresponded to the position of the target disc. The opening of the target was oriented horizontally for half of the trials (left/right counterbalanced) and vertically for the other half (top/down counterbalanced). For each item, the two distractors featured either a clockwise or counterclockwise rotation of 1 to 15° from the position of the target, with the amount of deviation being equal for both distractors. Trials varied along three difficulty levels based on the percentage of position difference between the opening of the distractor and the opening of the target. This meant a deviation of 11 to 15° compared to the target for easy trials, of 6 to 10° in medium trials and a deviation of 1 to 5° in hard trials. Sixty items were presented in this task with 20 items by difficulty level.

Control matching task: Reaction time subtest

The reaction time subtest is a matching task used to measure the general processing speed required to provide a manual motor response using the switches, the matching skills, and to measure visual-attentional abilities. Children were presented with 24 colored geometric shapes (e.g., circle, arrow, rectangle, and cross) and were asked to select the identical stimulus presentation from among three possibilities. The distractors were highly distinguishable from the targets as they differed in shape, size and color to minimize perceptual processing. As in the other matching tasks of the battery, stimuli were left in full view with no time limit. The individual motor response latencies were

used to control for inter-individual differences in general processing speed in the matching tasks. A minimum score of 22/24 correct responses on this task was used as an exclusion criterion for this experiment. Failure to reach this target meant that the participant did not proceed to the experimental tasks and was removed from the study.

Procedure

Children were tested individually in a quiet room. The order of the tasks was counterbalanced across children with the exception of the control task: the reaction time subtest was administered first to allow the children to become familiar with the equipment. Each subtest started with two practice trials that presented the easiest items to ensure that children had understood the instructions and requirements of the task. No feedback was provided during the test. The examiner intervened only in case of technical difficulties, to remind the participant of the instructions, or to maintain attention on the task if needed.

Results

Participants with z-scores lower than three standard deviations below the mean in one of the four tasks according to their age groups were considered as outliers. Four children met this criterion in one or more tasks and were removed from all analyses. Mean accuracy data, median reaction times and standard deviations of the four subtests were reported by age group and difficulty levels in Appendix B. All computations were performed using R (R Core Team, 2016) and Statistica 13 software (StatSoft France). Accuracy and reaction times data did not fit a normal distribution even when subjected to natural logarithm transformations. Accordingly, data were analyzed using non-parametric statistics. Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were carried out to examine the effect of age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, Adult) on both correct response percentages and median reaction times in each difficulty level of the four subtests. When statistically significant differences were detected, multiple post-hoc comparisons were performed between the adult age group and the other age group. These consisted of the Wilcoxon rank-sum test and multiple comparison adjustment using Benjamini and Hochberg's (1995) approach to determine the age at which the process at work reached maturity. Moreover, Friedman tests (with

a significance level of 5%) were carried out to test the effect of difficulty level on both correct response percentages and median reaction times in each of the four subtests. It has to be noted that median reaction times are based only on correct responses and subjected to a transformation using the formula (RT subtest – RT control task), while controlling for global processing speed differences. The youngest participants, that is, the 4-year-old children, had response percentages equivalent to or below to chance level (33% of correct responses) for several difficulty levels in the different tasks. In these cases, their data were not considered in the RT analyses.

The oblique effect was assessed as the difference between the correct response percentages for vertical and horizontal trials, and the correct response percentages for oblique trials [(vertical + horizontal)-oblique]. An oblique effect close to 0 indicates minimal or no difference between the processing of oblique versus vertical/horizontal lines. Conversely, a positive oblique effect suggests that vertical and horizontal lines are easier to process than oblique lines.

The effect of gender was then assessed in each task with non parametric Mann-Whitney tests in accuracy, RTs, and error analyses but this effect was never significant ($ps > .05$).

Length

Accuracy. Figure 1a reports mean accuracy data in each age group and for each level of difficulty in the length judgment task. Percentages of correct responses obtained for each level of difficulty were first compared to the score expected by chance (i.e. 33%) with a one-sample Wilcoxon test with a Bonferroni correction for multiple comparisons (significance level at .007). Performance on hard trials was equal to chance level in all age groups, $0.72 < zs < 2.14$, $ps > .03$. Accordingly, this level of difficulty was not included in the subsequent analyses. Performances on medium trials differed significantly to chance in all age groups, $3.81 < zs < 4.96$, $ps > .03$, except at 4 years, $z = 2.10$, $p = .03$. Performance on easy trials differed significantly to chance in all age groups, $3.11 < zs < 5.64$, $ps < .001$.

Friedman tests yielded significant differences between the easy and medium levels of difficulty, $\chi^2 = 125.92$, $p < .001$, with lower performance induced by higher level of difficulty. Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each difficulty level to assess the effect of age. Easy trials showed a significant increase in performances across age, $H(6) = 33.88$, $p < .001$. From 13-14 years onwards, children performances did not show any significant difference from adults ($ps > .10$). Medium trials showed a slight and constant increase in performances across age but this effect failed to reach significance, $H(6) = 11.18$, $p = .08$.

RTs. A Friedman test showed no significant effect of difficulty on reaction times, $\chi^2 = 0.97$, $p = .75$. Yet, Kruskal-Wallis tests showed a significant decrease in RTs across age for both easy, $H(5) = 26.78$, $p < .001$, and medium trials, $H(5) = 10.89$, $p = .05$. For both levels of difficulty, from 9-10 years onwards, children's processing speed was not significantly different to adults' performances ($ps > .10$).

Surface

Accuracy. Mean accuracy data in the surface judgment task are presented in Figure 1b for each age group and level of difficulty. Percentages of correct responses for hard trials were equal to chance in 4- to 10-year-old children, $1.44 < zs < 2.23$, $ps > .02$. Performances on medium trials was equal to chance only in 4-year-old children, $z = 1.91$, $p = .05$, and performances on easy trials differed significantly to chance in all age groups, $zs > 3.29$, $ps < .001$.

A Friedman test yielded significant difference between the three difficulty levels, $\chi^2 = 386.34$, $p < .001$, with lower performance induced by higher level of difficulty. Pairwise Wilcoxon comparisons indicated better performance on easy than on medium trials and, similarly, better performance on medium than on hard trials ($ps < .05$). Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each difficulty level to assess the effect of age. Easy and medium trials showed a significant increase in performance across age, respectively $H(6) = 44.18$, $p < .001$, and $H(6) = 45.97$, $p < .001$. From 9-10 years onwards, children's performance did not show any significant difference from adults ($ps > .10$). Hard trials did not show any significant increase in performances across age, $H(6) = 9.50$, $p = .15$.

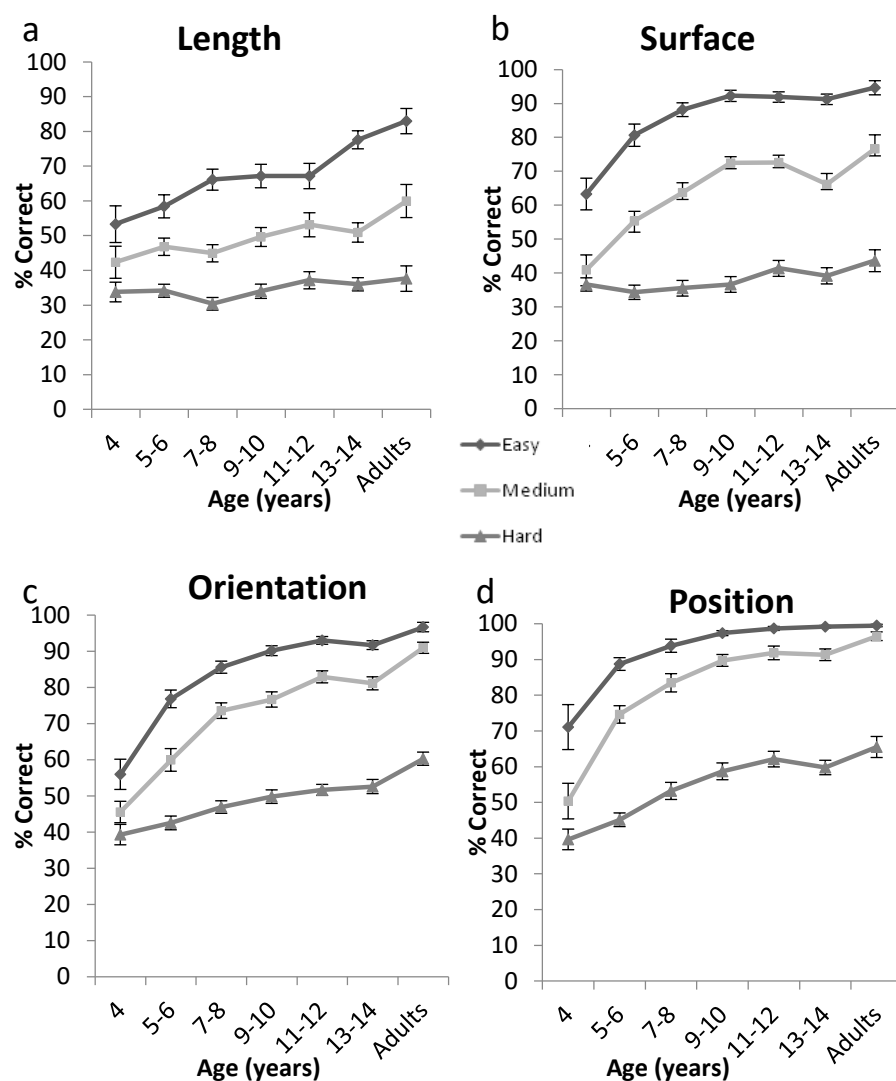


Figure 1. Correct response percentages in the (a) length, (b) surface, (c) orientation, and (d) position judgment tasks by age and difficulty levels. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

RTs. Friedman tests showed a significant effect of difficulty on reaction times, $\chi^2 = 70.11$, $p < .001$, with slower RTs induced by higher level of difficulty. Yet, Kruskal-Wallis tests showed a significant decrease of RTs across age for both easy, $H(5) = 31.37$, $p < .001$, and medium trials, $H(5) = 13.15$, $p = .02$. For both levels of difficulty, from 9-10 years, children processing speed did not show any significant difference to adults ($ps > .10$). However, the effect of age was non-significant for hard trials, $H(5) = 7.18$, $p = .21$.

Orientation

Accuracy. Figure 1c reports mean accuracy data in each age group and for each level of difficulty in the orientation judgment task. In all age groups and difficulty levels, percentages of correct responses differed significantly to chance, $zs > 2.16$, $ps < .03$.

Friedman tests yielded significant difference between the three difficulty levels, $\chi^2 = 369.69$, $p < .001$, with lower performances induced by higher level of difficulty. Pairwise Wilcoxon comparisons indicated better performance on easy as opposed to medium trials and on medium as opposed to hard trials ($ps < .001$). Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each difficulty level to assess the effect of age. Three difficulty levels showed a significant increase in performances across age, respectively easy $H(6) = 83.50$, $p < .001$, medium $H(6) = 85.52$, $p < .001$, and hard $H(6) = 44.31$, $p < .001$, but did not yet reach maturity before adulthood meaning that children's performance showed significant differences from adults at all ages ($ps < .001$). However, different developmental patterns can be distinguished according to the three difficulty levels, with a sharp increase in performance from 5 years for easy and medium trials, contrasting with a more subtle but constant increase across ages for hard trials.

One-sample Wilcoxon tests were run in each difficulty level to determine whether the oblique effect differed significantly from zero. The oblique effect was significantly higher than zero whatever the level of difficulty in all age groups ($ps < .05$) with the exception of the hard trials in 4- to 8-year-old children ($ps > .06$).

The effect of age was examined using Kruskal-Wallis tests for each difficulty level. Easy trials showed a significantly decreasing influence of oblique across age, $H(6) = 45.32$, $p < .001$, principally between 4- and 9-years-old. By contrast, the sensitivity to oblique orientation remained stable across age for medium and hard trials, respectively, $H(6) = 6.72$, $p = .35$ and $H(6) = 10.85$, $p = .09$.

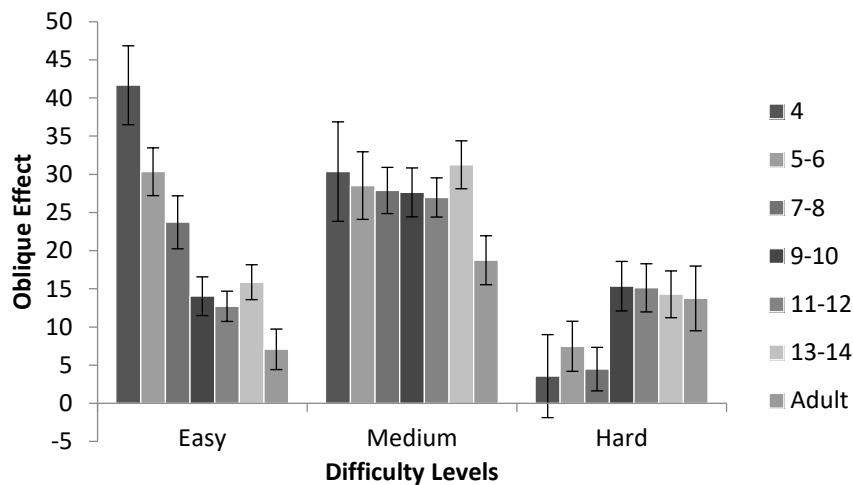


Figure 2. Oblique effect by difficulty level in the orientation subtest for each typically developing child. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each column.

RTs. Friedman tests conducted on median reaction times yielded significant differences between the three difficulty levels, $\chi^2 = 25.67$, $p < .001$, with slower RTs induced by higher levels of difficulty. However, Kruskal-Wallis tests showed a significant decrease of RTs across age for both, easy, $H(5) = 44.74$, $p < .001$ and medium trials, $H(5) = 11.73$, $p = .04$. Children's processing speed was not significantly different to adults from age 11-12 years in easy trials ($ps > .10$) and from age 9-10 years in medium trials ($ps > .10$). Hard trials did not show any effect of age, $H(5) = 7.15$, $p = .21$.

Position

Accuracy. Figure 1d represents mean accuracy data in the position judgment task for each age group and level of difficulty. Percentages of correct responses for hard trials were equal to chance level in 4-year-old children, $z = 1.85$, $p = .06$. In all other age groups and difficulty levels, percentages of correct responses differed significantly to chance, $z > 3.23$, $ps < .01$.

Friedman tests yielded significant differences between the three difficulty levels, $\chi^2 = 399.42$, $p < .001$, with lower performances induced by higher level of difficulty. Pairwise Wilcoxon comparisons indicated better performance on easy as opposed to medium trials and on medium as opposed to hard trials ($ps < .05$). Kruskal-Wallis tests were conducted for each difficulty level to assess the effect of age. Trials showed a significant increase in performance across age in easy $H(6) = 68.31$, $p < .001$, medium $H(6) = 75.81$, $p < .001$, and hard level $H(6) = 56.1$, $p < .001$. Easy trials showed a significant increase in performance between 4 and 9-10 years. Children's performance did not show any significant difference to adults from 11-12 years in easy trials, and from 13-14 years in medium and hard trials ($ps > .10$).

RTs. Friedman tests conducted on median reaction times yielded significant differences between the three difficulty levels, $\chi^2 = 117.59$, $p < .001$, with slower RTs induced by higher levels of difficulty. However, Kruskal-Wallis tests showed a significant decrease in RTs across age for both easy, $H(5) = 45.21$, $p < .001$, and medium trials, $H(5) = 21.91$, $p < .001$. Children's processing speed was not significantly different to adults from 11-12 years. Hard trials did not show any effect of age, $H(5) = 9.72$, $p = .08$.

Discussion

The aim of the first experiment was to examine the typical developmental trajectory of basic visual perceptual processing. To this end, 4 to 14 year-old children and young adults were administered a series of basic visual perceptual judgment tasks to determine whether the processing of length, surface, orientation and position follow homogeneous developmental trajectories or reach maturity at a different pace. As expected, results showed a significant improvement in processing performance with age and at the same time, a significant decrease in response latency from younger to older participants on the four basic visual perceptual components assessed. Interestingly, the developmental course of these basic visual perceptual components is highly variable depending on the level of difficulty, that is, the saliency of the difference to be perceived in each task. On the one hand, easy trials seem to be sufficient to discriminate performance in the younger age groups but were too simple and thus not sensitive enough to discriminate the performances in older participants (i.e. older

children and adults). On the other hand, the hard trials present very subtle perceptual differences which seem to be necessary, at least in some tasks, to discriminate basic perceptual abilities in adolescents and adults. However, hard trials turned out to be too complicated for younger participants who were not able to perceive any difference at all and performed at chance. Finally, the medium level of difficulty appeared to be the one that was the most sensitive to age differences from younger to older participants, giving a global picture of the developmental course of the four basic visual perceptual processing components of interest, as recommended by Thomas et al. (2009).

In the length judgment task, the hard level provided no additional information about the development of the length processing. By contrast, easy and medium levels were sufficiently sensitive to gauge the entire progression from 4 years until adulthood. In fact, performance in easy trials reached the adult level of accuracy by the age of 13-14 years, whereas performance on medium trials continued to improve continually until adulthood. Contrary to the study of Pisella et al. (2013) who showed that children's performance progressed only until the age of 8 years, our results demonstrated that the processing of length continue to develop until adulthood as long as the length differences to be perceived are subtle enough. Comparatively, using a similar length judgment task, Link and Tindall (1971) reported better performance (from 80 to 97% of correct responses) than ours (from 37 to 83% of correct responses) in young adults. This large accuracy discrepancy between the two studies could be explained by different variables such as the response choice (same-different vs matching with one of three proposed stimuli), the stimuli presentation (sequentially on the computer screen vs simultaneously presented at different places of the screen), or differences in levels of difficulty (5 to 20% vs 1 to 15%).

In the surface judgment task, performance on hard trials did not show any improvement with age. By contrast the adult level of performance was reached by the age of 9 years in easy and medium trials, similarly to the Pisella et al. study (2013), which showed a significant progression of performances until 8 years.

In the orientation judgment task, the three difficulty levels showed different developmental patterns. Easy and medium trials showed a sharp increase in performance starting at 5 years, but still improved until adulthood, while hard trials showed a slight but constant increase with age until adulthood. This growing sensitivity

to perceive orientation differences during childhood until adulthood is in accordance with other studies (Butcher et al., 2012; Palomares et al., 2009; Pisella et al., 2013). Our results provide additional support for an oblique effect in children and adults (Appelle, 1972; Furmanski & Engel, 2000; Gentaz & Hatwell, 1995). Vertical and horizontal items were processed significantly better than oblique items in the orientation subtest. The presence of this effect varied depending on the age and the level of difficulty. The impact of oblique orientation decreased with age in the easy level, was observed in all age groups in the medium level, but was absent in children aged 4 to 8 years old in the hard level. In this level, the orientation differences between the target and the distractors were too small to be perceived by younger children, resulting in very low performance on the three item positions.

Finally, in the position judgment task, the adult level of performance was reached by the age of 11 years in easy trials and by the age of 13 years in medium and hard trials.

To sum up, the distinctive evolution of accuracy and reaction time in the three difficulty levels provides a clearer representation of the developmental trajectories of the four visual perceptual components. Results of this first experiment showed that the development of processing of these components is separable into distinct trajectories in TD children. As summarized in Table 2, surface processing is already mature by the age of 9-10 years, length and position processing reach maturity by the age of 13-14 years, while orientation processing continues to develop beyond the age of 14 years.

Table 2.

Ages of maturity in the four subtests by difficulty level.

Difficulty		Length	Surface	Orientation	Position
Easy	Accuracy	13-14	9-10	Adult	11-12
	RTs	9-10	9-10	11-12	11-12
Medium	Accuracy	n s	9-10	Adult	13-14
	RTs	9-10	9-10	9-10	9-10
Hard	Accuracy	Chance level	n s	Adult	13-14
	RTs	/	n s	n s	n s

Note. Ns means that the effect of age was not significant.

Based on these distinct developmental trajectories, Experiment 2 will be conducted to examine how children with CP process basic visual perceptual dimensions. In fact, we

know that visual perceptual processing is often impaired in cerebral palsy (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2004, 2007, 2009; Menken et al., 1987; Stiers et al., 1999; van den Hout et al., 2004) but in this pathology, no study has actually focused on the processing of basic visual perceptual components which are a preliminary step for subsequent visual perceptual processes.

EXPERIMENT 2

In experiment 2, we aimed to examine the development of the four basic visual perceptual processes in a group of 5- to 14- year-old children with CP who were compared to two groups of TD children matched either on chronological age (TDca) or on nonverbal reasoning abilities (TDnv). The three main questions pertain to the selectivity, the specificity and the evolution of their basic visual-perceptual dysfunction across development: (1) Do children with CP present selective or global impairments of all basic visual perceptual processes in comparison with TD children? (2) Is their deficit specific to their visual perceptual disability or related to nonverbal intellectual limitations and (3) Does their basic visual perceptual processing present a simple developmental delay or do they follow an atypical developmental trajectory?

Methods

Participants

Eighty-six 5-to 14-year-old children with a diagnosis of spastic Cerebral Palsy took part in Experiment 2. All children suffered from prenatal or perinatal brain damage following a premature birth or not. All children with CP who met the inclusion criteria were recruited in rehabilitation and reference centers specialized in Cerebral Palsy in the Walloon Region and Brussels (CIRICU-Liège, CIMC and CBIMC centers– Belgium). They were included in the study after the children and their parents provided informed consent. They were predominantly Caucasian and from middle to high socioeconomic status. The experimental protocol was set up in compliance with the Declaration of Helsinki, and in accordance with the SRCD ethical standards in research. It was approved by the ethical committee of the Faculty of Psychology (University of Liège).

The selection of participants was submitted to the following exclusion criteria: the presence of head injury, meningitis, epileptic encephalopathy or anomaly of cerebral development such as a neuronal migration disorder or a corpus callosum agenesis. Children with and without mental retardation were included provided that they succeeded in the control matching task to ensure that they were able to understand the instructions (see Experiment 1).

Appendix D provides an overview of the main characteristics of CP children which were collected from medical records and parents'/caregivers' questionnaires.

Regarding motor disorders, 20% of children were diagnosed with diplegia, 20% with quadriplegia, 30% with right hemiplegia, and 30% with left hemiplegia. Eighty percent of the children could walk with no or only some restrictions; the remaining 20% of children used hand-held or motorised mobility devices. More than half of the children were born prematurely (i.e. 57 %), 43% of whom were very preterm (AG < 33 weeks), and 14% extremely preterm (AG < 28 weeks). Fifty-four children were born with low birth weight, 37% of whom had very low birth weight, and 11% had extremely low birth weight. A fifth of the children suffered from epilepsy, and were on drug treatment. Two thirds of children presented one or more neuro-ophthalmological disorders such as strabismus (39%) or astigmatism (26%). Regarding their education, two thirds of the children were enrolled in mainstream education and the others attended schools providing special needs support.

Each child with CP was individually matched with two TD children, one matched on chronological age (± 1 month) and the other matched on non verbal reasoning abilities as assessed using the Raven's Progressive Matrices (max 1 point difference in raw score within the matching pair). This matching procedure created two groups of TD children: one group of 86 TD children matched on chronological age (TDca group, 47 females, Mean age = 115.5 months \pm 36.04 [5 years - 14 years 11 months], mean Raven's raw score = 34.17 \pm 11.92,) and one group of 86 TD children matched on nonverbal reasoning abilities (TDnv group, 47 females, Mean age = 95.77 months \pm 30.89 [4 years 1 month - 14 years], mean Raven's raw score = Raven 28.95 \pm 9.81,). As expected, children with CP (44 females, Mean age = 115.58 months \pm 36.19 [5 years - 14 years 11 months], mean Raven's raw score = 29.08 \pm 9.73) differed from the TDnv group on chronological age, $t(85) = 3.86$, $p < .001$, but not from the TDca group,

$t(85) = -0.16$, $p = .87$. Conversely, they differed from the TDca group on the nonverbal reasoning measure, $t(85) = -3.07$, $p = .002$, but not from the TDnv group, $t(85) = -0.11$, $p = .91$.

Materials and Procedure

The materials, tasks, stimuli, and procedure were exactly the same as in Experiment 1.

Results

All computations were performed using the R software (R Core Team, 2016) and Statistica 13 software (StatSoft France). Full descriptive statistics by group, difficulty level and subtests are reported in the Appendices E-F. Two sets of analyses were performed on the data: (1) the *group effect analyses* which were carried out to examine the group differences in each task, (2) the *developmental analyses* which contrasted the developmental curves in the CP and the TDca groups to explore the persistence of their basic visual impairments across development.

Group effect analysis

Unlike Experiment 1, the accuracy data fit a normal distribution after which they were subjected to natural logarithm transformations. Accordingly, they were analyzed using parametric statistics. First of all, one-sample t-tests were conducted on percentages of correct responses in each difficulty level for the four subtests to compare performance against the score expected by chance (i.e. 33%). Secondly, performance across groups and levels of difficulty was compared in the four subtests. Considering that the effects of group and interaction might be different in younger and older participants, a median split procedure based on age was applied to divide the sample of children with CP in two equal groups contrasting younger and older participants. Then ANOVAs (with a significance level of 5%) with group (CP, TDca, TDnv) and Age split (young vs old) as between-subjects factors, and difficulty level (easy, medium, hard) as a within-subject factor, were carried out to test respectively the effect of group, of the median split between ages of children (the younger vs the older) and the effect of difficulty on correct response percentages in each difficulty level of the four subtests. For the sake

of brevity, the analyses reported here are focused on the effect of group (CP, TDca, TDnv) in younger and older participants.

By contrast, median RTs and oblique score did not fit a normal distribution, even after that they were subjected to natural logarithm transformations. Consequently, these data were analyzed using non-parametric statistics. Median reaction times controlled for general processing speed difference using the control task (subtest RTs – control task RTs). In the orientation subtest, non-parametric Friedman and Wilcoxon analyses were conducted on the oblique score to test children's sensitivity to oblique orientations.

Length

Accuracy. One-sample t-tests with a Bonferroni correction for multiple comparisons (significance level at .008) performed on percentages of correct responses showed that performances on hard trials was equal to chance level (i.e. 33%) in all groups, even considering only older participants, $-.51 < t_s < 2.35$, $ps > .02$. Accordingly, this level of difficulty was not included in the subsequent analyses. Accuracy for easy and medium trials differed significantly to chance in all three groups, $3.11 < t_s < 11.84$, $ps < .003$, regardless of age (young vs old).

An ANOVA revealed a significant effect of difficulty, $F(1,252) = 120.26$, $p < .001$, group, $F(2,255) = 10.78$, $p < .001$, and a significant interaction between group and difficulty, $F(2,252) = 5.45$, $p = .004$. As shown in Figure 2a, children with CP showed lower accuracy than TDca children in easy and medium trials, $ps < .01$, a difference that was larger for easy trials. Conversely, they do not differ from TDnv children regardless of the level of difficulty, $ps > .20$. However, there was no effect of age-split, $F(2,252) = 0.29$, $p = .59$, nor any interaction with age-split ($ps > .08$).

RTs. Kruskal-Wallis tests did not show any significant RTs differences between groups, $H(2,204) = 2.09$, $p = .35$, even when considering young, $H(2,99) = 0.89$, $p = .64$, and older children, $H(2,105) = 3.8$, $p = .15$, separately.

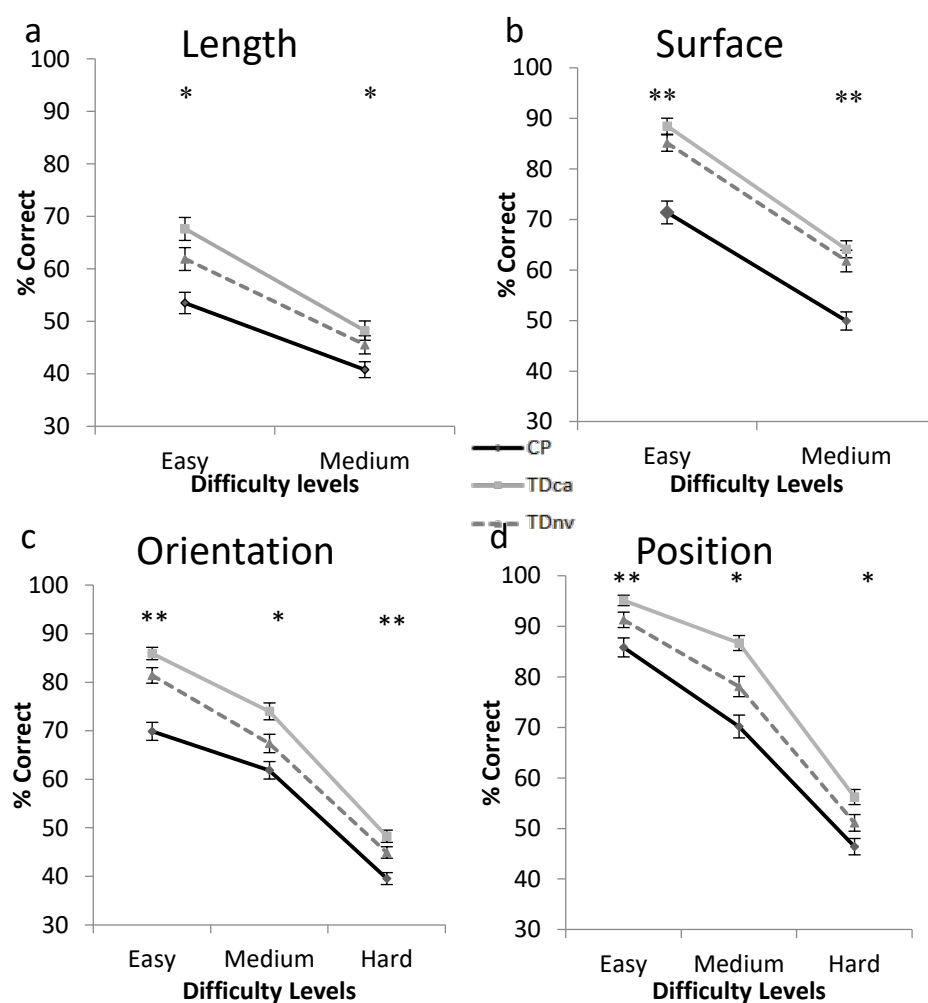


Figure 2. Correct response percentages in the (a) length, (b) surface, (c) orientation, and (d) position judgment tasks by children group in the different difficulty levels. Performances decreased with higher difficulty level, lower in children with CP than in TD children. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

* represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP and TDca children.

** represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP, and TDca and TDnv children.

Surface

Accuracy. One-sample t-tests indicated that percentages of correct responses for hard trials were equal to chance level (i.e. 33%) in young and old children with CP, and in young TDca and TDnv children, $-0.98 < ts < 2.13$, $ps > .04$. Accordingly, this level of difficulty was not included in subsequent analyses. As shown in Figure 2b, performances on easy and medium trials differed significantly to those expected at chance, $7.32 < ts < 43.99$, $ps < .001$.

An ANOVA revealed significant effects of group, $F(2,252) = 15.05$, $p < .001$, difficulty, $F(1,252) = 199.14$, $p < .001$, and age-split, $F(1,252) = 10.09$, $p = .002$, but no significant interactions ($ps > .10$). Children with CP showed lower accuracy than TDca, and TDnv children ($ps < .001$) and the youngest participants showed lower performance than the oldest.

RTs. Kruskal-Wallis tests did not show RT differences between groups, $H(2,236) = 2.12$, $p = .35$, even when considering young, $H(2,112) = 0.76$, $p = .68$, and older children, $H(2,124) = 2.17$, $p = .34$.

Orientation

Accuracy. One-sample t-tests indicated that performances on easy, medium, and hard trials differed significantly to chance (i.e. 33%) in all groups whether young or old, $2.58 < ts < 54.49$, $ps < .001$.

An ANOVA revealed significant effect of group, $F(2,252) = 7.68$, $p < .001$, difficulty, $F(2,504) = 146.43$, $p < .001$, as well as a significant group by difficulty interaction, $F(4,504) = 3.36$, $p = .009$. As shown in Figure 2c, children with CP showed lower accuracy than both TDca and TDnv children in easy ($ps < .02$) and hard trials ($ps < .006$), while in medium trials children with CP showed lower accuracy than TDca children ($p = .05$), but comparable accuracy to TDnv children ($p = .55$). This ANOVA also revealed a significant effect of age split, $F(1,252) = 10.89$, $p = .001$, with the youngest children showing lower accuracy than the oldest. The other interactions with age-split were non-significant ($ps > .10$).

To assess the presence of the oblique effect, we computed an oblique score as in Experiment 1. Figure 3 represents the mean oblique score by group and difficulty level

(see the Appendix G for complete descriptive statistics by group and by difficulty level for each item position, i.e., vertical, horizontal and oblique). In TDca and TDnv children, oblique scores were significantly higher than zero in the three difficulty levels ($ps < .001$). However, in children with CP, the oblique scores were significantly higher than zero in easy and medium levels only, respectively in easy, $Z = 7.74$, $p < .001$, medium, $Z = 6.92$, $p < .001$, but not in the hard level, $Z = 0.24$, $p = .81$. A Kruskal-Wallis test was conducted on this oblique score revealed a significant effect of group, in the easy, $H(2,258) = 23.05$, $p < .001$ and in the hard level, $H(2,258) = 8.127$, $p = .01$, but no group effect in the medium level, $H(2,258) = 1.04$, $p = .59$. In the easy level, the oblique score is significantly higher in children with CP than in TDca and TDnv children ($ps < .001$), indicating a higher sensitivity to oblique orientations. Conversely, in the hard level, the oblique score is significantly lower in children with CP than in TDca and TDnv children ($ps < .05$).

RTs. Kruskal-Wallis tests did not show any differences between groups, $H(2,235) = 1.1$, $p = .58$, even when considering young, $H(2,112) = 1.35$, $p = .51$, and older children, $H(2,123) = 1.003$, $p = .60$.

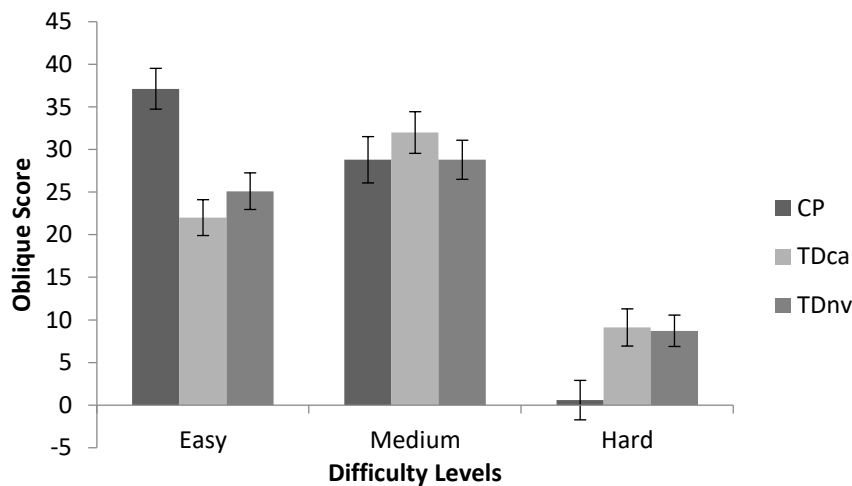


Figure 3. Oblique effect by children group and difficulty level. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each column.

Position

Accuracy One-sample t-tests showed that performances on easy, medium, and hard trials differed significantly to chance (i.e. 33%) in all children and age groups, $5.63 < t_s < 159.23$, $ps < .001$.

As shown in Figure 2d, an ANOVA yielded significant effect of group, $F(2,252) = 15.86$, $p < .001$, and difficulty level, $F(2,504) = 320.11$, $p < .001$, as well as a significant interaction between those two factors, $F(4,504) = 6.89$, $p < .001$. In easy trials, children with CP showed lower accuracy than TDca ($p < .001$), and TDnv children ($p = .004$), while in medium and hard trials, children with CP performed lower than TDca ($ps < .001$) but did not differ from TDnv children ($ps > .09$). There was a significant effect of age-split, $F(1,252) = 9.11$, $p = .002$, and a significant group by age-split interaction, $F(2,252) = 3.16$, $p = .04$. The performances of children with CP was lower than that of the TDca children ($p < .001$), and TDnv children ($p = .003$), but only in the young age-split group. The performances of the three groups did not differ in the older children ($ps > .05$).

RTs. Kruskal-Wallis tests did not show any differences between group, $H(2,235) = 2.2$, $p = .32$, even when considering young, $H(2,112) = 0.26$, $p = .88$, and older children, $H(2,123) = 5.06$, $p = .08$.

Developmental analysis

In this analysis, we compared the developmental trajectories of children with CP to those of TDca children to determine how the probability of success in each task is modulated by age and group memberships. To this end, logistic regression analyses (with a significance level of 5%) were conducted on the probability of success in each subtest in order to test the effect of group (CP, TDca), age (5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14) and their possible interaction. These analyses were used to determine whether basic visual perceptual impairments reflect a simple developmental delay, persistent or specific deficits (Thomas et al., 2009).

Length

The logistic regression analysis revealed that TDca children exhibited a higher probability of success than children with CP, $G^2 = 59.83$, $df = 1$, $p < 0.001$. However, as depicted in Figure 4a, there was neither an effect of age, nor any significant age by group interaction ($ps > .50$), indicating that the group effect was comparable across all age groups from the age of 5-6 years old. Children with CP showed stable and persistent delay over time. In fact, their probability of success did not reach that of 5-6 year-old TDca children.

Surface

The logistic regression analysis revealed a significant effect of group, $G^2 = 148.04$, $df = 1$, $p < 0.001$, and age, $G^2 = 38.79$, $df = 4$, $p < 0.001$. As shown in Figure 4b, the probability of success was significantly higher in the TDca group compared to children with CP (young and old), and increased with age in the two groups, most marked between 7-8 and 9-10 years-old. Moreover, the difference between groups tended to increase slightly with age but the interaction between age and group failed to reach significance, $G^2 = 8.41$, $df = 4$, $p = 0.08$. The probability of success of 13-14 years-old children with CP did not reach that of 5-6 year-old TDca children, $G^2 = 4.51$, $df = 1$, $p < .001$, confirming the presence of a stable and persistent delay.

Orientation

As depicted in Figure 4c, the logistic regression analysis revealed a significant effect of group, ($p < .001$), and age ($p < .01$) as well as a significant interaction between age and group, $G^2 = 9.84$, $df = 4$, $p = 0.04$. TDca children and children with CP showed a parallel increase of probabilities of success between 5 and 10 years. From this age, the two children groups showed a slightly different progression, TDca children did not show any improvement, while children with CP showed a slight but not significant decrease of probabilities of success. The probability of success was higher in TDca children than in children with CP but the group differences increased during the course of development: the gap between groups was significant at 5-6 years but it was significantly larger in the oldest age group. Children with CP showed a persistent delay increasing with age.

Probabilities of success of 13-14 years-old children with CP did not reach that of 7-8 years old TDca children, $G^2 = 10.82$, $df = 1$, $p < .001$.

Position

The logistic regression analysis revealed main effects of group ($p < .001$), age ($p < .05$) as well as a significant interaction between age and group, $G^2 = 43.59$, $df = 4$, $p < .001$. In TDca children, probabilities of success increased between 5 and 10 years, then they did not show any improvement until 14 years. In children with CP, probabilities of success increased between 5 and 10 years-old, but not between 5-6 and 7-8 years, then they showed a significant decrease between 10 and 14 years. As displayed in Figure 4d, TDca children showed a higher probability of success than children with CP but this group effect increases across age. It was significant at 5-6 years but the group difference was significantly larger from 9-10 years onwards, thus confirming the presence of a persistent delay increasing with age. Thirteen- fourteen years-old children with CP showed a lower probability of success lower than that of 5-6 year old TDca children, $G^2 = 4.51$, $df = 1$, $p = .03$.

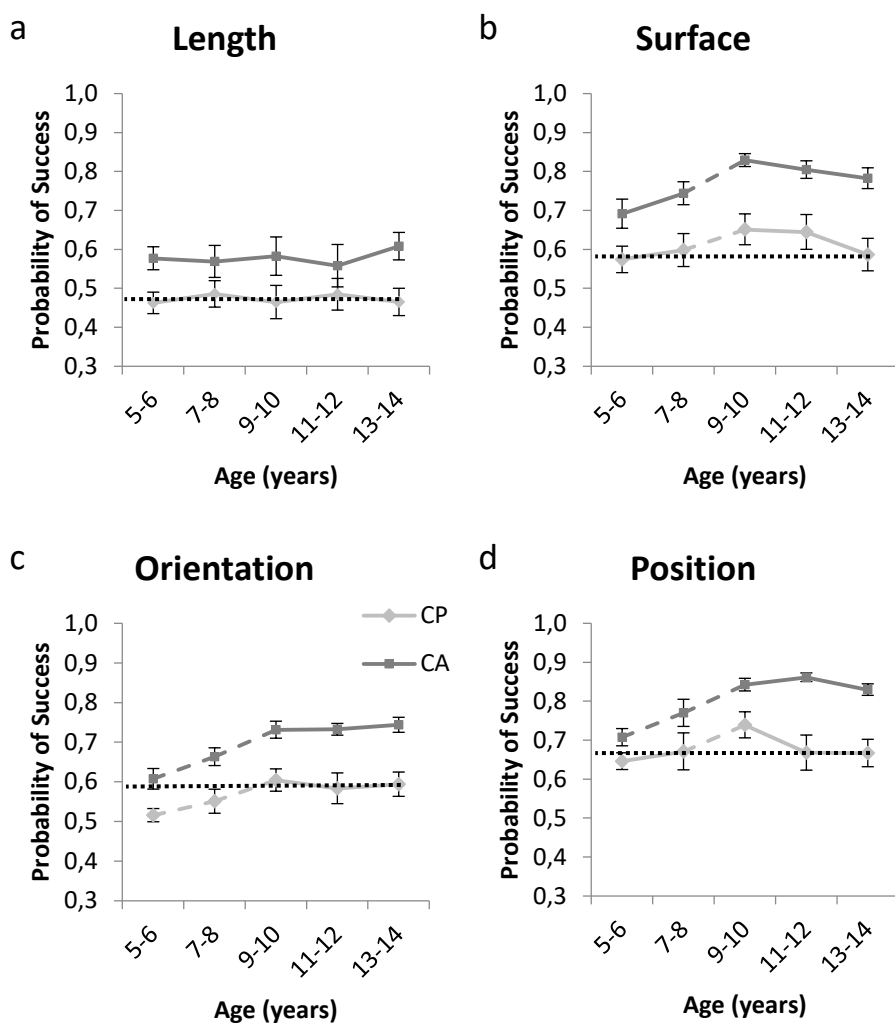


Figure 4. Probabilities of success in the (a) length, (b) surface, (c) orientation, and (d) position judgment tasks by age group in children with CP and TDca children.

..... Represents the level of probability of success reached by 13-14 years children with CP

--- Represents the interval of age in which performance increase significantly

Discussion

This second experiment examined the development of four basic visual perceptual processing components (i.e. length, surface, orientation and position) in children with Cerebral Palsy. The first aim was to determine whether they presented a selective (i.e. restricted to some components) or a global impairment (i.e. all basic components) compared to TD children. The second aim concerns the specificity of the observed deficits meaning that children with CP were expected to perform lower than TDca and TDnv children. Finally, the third objective was to examine the developmental trajectory and determine if basic visual perceptual processing presents a developmental delay, persistent or not (i.e. typical but delayed developmental trajectory) or an atypical developmental trajectory.

Compared to typically developing peers of the same age, children with CP exhibited lower sensitivity to length, surface, orientation, and position differences whatever the level of difficulty, indicating that the processing of basic visual perceptual characteristics is globally impaired in children with CP. Moreover, they also performed lower than TDnv children in easy and medium trials in the surface subtest, in easy and hard trials in the orientation subtest, and in easy trials in the position subtest. So, children with CP showed specific impairments in the processing of the visual perceptual components of surface, orientation and position, at least at one level of difficulty.

The developmental curves comparison revealed a lower probability of success for children with CP than for TDca children in the four subtests for all age groups. In the orientation subtest, 13-14 year-old children with CP barely reached the level of 5-6 year-old typically developing children while in the length, surface, and position subtests, they did not even reach this level. It is quite remarkable to see how the gap between children with CP and their typically developing peers persists across ages. Moreover in the length and surface subtests, the developmental curves of the two groups are completely parallel, with consistently lower performance in children with CP, suggesting that children with CP present a stable and persistent developmental delay. By contrast, these curves followed divergent trajectories in the orientation and position subtests. In these tasks, the probability of success increased in parallel in both groups between 5 and 10 year-old. Subsequently, the developmental curve remained stable in TDca children while it showed a slight decrease between 10 and 14 years in children with CP.

So the differences between groups increase with age in these two subtests, indicating atypical development of the processing of orientation and position (a delay increasing with age).

In sum, these results indicate that children with CP present persistent deficits across age for the processing of basic visual perceptual features, compared to TDca children. Specific deficits were observed in all components, with the exception of the length subtest, the medium trials of the orientation subtest, and the medium and hard trials of the position subtest in which children with CP only showed a persistent developmental delay according to their intellectual limitations.

The oblique effect varied in the three groups depending on the difficulty level. Compared with TDca and TDnv children, children with CP showed a larger oblique effect in easy trials and a smaller oblique effect in hard trials, while in medium trials, the three groups were equally sensitive to the oblique effect. This could be explained by the fact that in easy level, TD children showed a ceiling effect in non-oblique trials (i.e. vertical and horizontal) resulting in a smaller oblique effect (i.e. 15 to 28 % of difference) than children with CP, who still show an important discrepancy between non-oblique and oblique trials (i.e. 33 to 40% of difference). Conversely, in hard level, children with CP showed low performance in both oblique and non-oblique trials, so their oblique effect remained very small, and significantly smaller than those of TD children.

Finally, it is worth noting that children with CP did not show any difference in RTs to TDca and TDnv children, except in the medium level of the surface subtest in which they showed higher RTs than TDca children. This means that despite their significant deficits, children with CP did not show any slowing of RTs for the processing of these four basic visual perceptual components, the length, the surface, the orientation and the position when motor response times were removed to take their motor limitations into consideration.

GENERAL DISCUSSION

The present study addressed two main issues concerning the development trend of basic visual perceptual components in typically developing children and in children with CP using the four subtests of the BEVPS battery. These four subtests provided a fine-grained and complete assessment of basic visual perceptual components, namely, length, surface, orientation and the position in children with typical development and those with developmental disorders. These tasks provide a systematic variation of three levels of difficulty in order to capture the entire developmental curve of each processing. Results indicated that each level of difficulty (easy, medium and hard) showed different sensitive periods of development at different ages with the exception of the hard level in the length and surface subtests which were performed at chance by all participants. These subtests therefore yielded no additional information about the development of the length and surface processing, in contrast to the easy and the medium levels of difficulty, which were useful to characterize the developmental trajectories of TD and CP participants. These subtests could thus be used in children with other neuro-developmental disorders which are marked with severe visual-spatial difficulties such as Williams syndrome or 22q11.2 syndrome, in order to better understand the impact of length and surface processing on these difficulties.

This study is the first to highlight the typical development of these processes prior to adulthood. Our results also reveal the presence of persistent deficits in basic visual perceptual processing in children with CP. These results demonstrate the importance to specifically assessing basic visual perceptual processing in atypical development as it could prove useful in the early detection of these difficulties in children with the risks for visual-perception difficulties. Deficits in basic visual perceptual processing could be the root of later visual perceptual disorders experienced by children with CP (Fazzi et al., 2004, 2007, 2009; Stiers et al., 2002). This study also showed the importance to separately assess the four visual perceptual components, which exhibit different developmental trajectories. In fact, children with CP demonstrate a lower ability to process orientation than TD children, a result consistent with those reported in other neuro-developmental disabilities such as Williams syndrome (Palomares et al., 2009), developmental agnosia (Joy & Brunsdon, 2002), and prematurity (Issacs, 2003; O'Reilly, 2010). Moreover, non-oblique lines (i.e. vertical and horizontal) were better processed than oblique ones, in keeping with Palomares (2009) study of children and

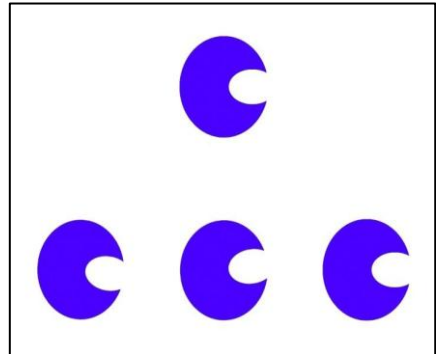
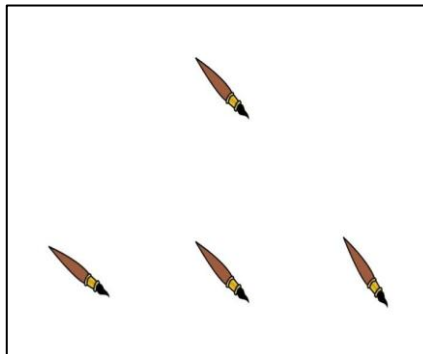
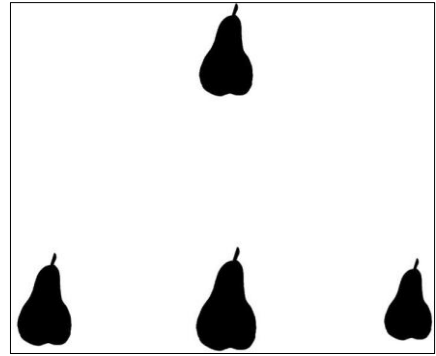
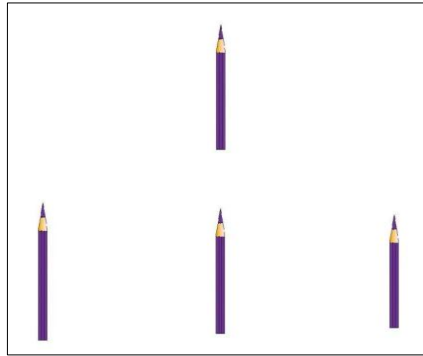
adults with Williams's syndrome and typical development. These perceptual disorders of basic visual components could have a negative impact on the evaluation of other cognitive functions and on school learning. If such functions are evaluated using visually presented materials, children with these disorders may be impeded by their visual perceptual deficits as opposed to the cognitive challenge of the test. There is therefore a risk of a false attribution of the child's impairments.

Our sample was restricted to a subsample of 5 to 14 year old children with cerebral palsy in an attempt to reduce the heterogeneity inherent to cerebral palsy. Further studies are necessary to determine whether these conclusions could be extended to children with other forms of cerebral palsy or to older children. In the future, it would be important to include children and adolescents above the age of 14 and adults with CP to determine whether basic visual perceptual processing improves beyond the age range considered here. In particular, it would be interesting to assess children above age 14 with the position subtest to see if a decline of these abilities can be observed later in childhood. Further studies should be conducted with a larger sample of children with CP to determine which factors influence or degrade the processing of basic visual perceptual components. Finally, other studies are necessary to explore integrative and transformative visual perceptual processing leading to view-dependent and view-independent object representation both in typical and atypical development.

APPENDICES

Appendix A.

Examples of the four subtests



Appendix B.

Descriptive statistics: mean percentages of correct responses (RCO), median reaction times (RTs), and standard deviations for each difficulty level of the four subtests, namely the length judgment task, the surface judgment task, the orientation judgment task, and the position judgment task according to the seven age groups in the typically developing group.

		Accuracy data													
		4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		adults	
Task	Difficulty	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Length	Easy	53.3	19.7	58.5	20.8	67	19.4	65.8	21.2	67.2	22.5	77.5	16.6	83	16.2
	Medium	42.4	17.3	46.8	15.6	45.3	15.5	48.5	17.2	53.2	21.3	51.8	18.6	60	21.3
	Hard	33.8	10.6	34.2	11.7	30.5	11.2	34.3	12.8	37.2	15.2	36.3	12.3	37.7	16.4
Surface	Easy	63.3	17.5	80.7	20.6	87.5	13.3	89.5	15.8	91.9	9.4	91.2	9.9	94.7	9.3
	Medium	40.9	16.5	55.4	17.8	63.5	17.9	70.7	14	72.6	13.3	65.6	20.9	76.7	18.4
	Hard	36.7	7.3	34.4	13.2	35.3	14.3	36.5	14	41.4	14.5	39.8	15.9	43.7	14.4
Orientation	Easy	55.9	15.6	76.8	15.3	85.6	10.4	90.1	8.4	93	6.6	91.7	7.9	96.7	5.8
	Medium	45.5	11.1	59.9	19.5	73.6	13.4	76.6	13	82.9	10.2	81.1	11.7	90.9	6.9
	Hard	39.3	10.6	42.5	11.9	46.9	10.8	49.8	11.5	51.6	9.4	52.6	12.7	60.3	8.1
Position	Easy	71.1	23.5	88.7	11.1	92.5	14.2	95.7	11.5	98.7	3.4	99.2	2.2	99.5	1.5
	Medium	50.4	18.6	74.6	15.2	82.1	17.9	88	13.3	91.8	11.8	91.5	10.5	96.5	5.4
	Hard	39.6	10.8	45.1	11.9	52.7	15	58.7	14.1	62.1	13.5	59.6	13	65.5	13.2

		Median reaction times (ms)													
		4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		adults	
Task	Difficulty	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Length	Easy	1314	758	4414	4127	5322	2871	3885	2243	4408	2493	4130	4452	3783	2092
	Medium	3460	2827	4138	3206	4482	2909	4084	2337	3540	2465	2689	1458	3273	1961
	Hard	2297	1813	4216	2347	4055	2282	3291	1987	2498	1021	2581	1621	2265	1266
Surface	Easy	2009	1555	3935	4195	5302	4343	4934	2873	3903	2714	3204	1412	3871	1868
	Medium	5739	7429	3128	2625	3781	2230	2556	1201	2479	1660	2588	1410	2423	1515
	Hard	4104	2629	3254	1943	2442	1180	2290	1270	1788	671	1843	876	1706	742
Orientation	Easy	1771	1758	2448	2818	2364	1968	3110	3997	2723	2209	2223	1505	2978	1310
	Medium	1043	904	2365	2066	2186	1237	1993	1142	1728	1183	1371	642	1832	1163
	Hard	2575	2024	2661	1879	2013	876	1830	899	1335	691	1253	523	1210	522
Position	Easy	1788	1494	2791	2905	2472	2088	2500	1712	3020	1940	2347	1618	3183	1392
	Medium	4154	4868	2494	1911	1795	1063	1484	587	1577	771	1238	540	1318	552
	Hard	3631	6987	1960	1020	1543	790	1204	395	1095	495	999	416	939	351

Note. Bold numbers indicate accuracy reached ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix C.

Descriptive statistics: mean percentages of RCO and standard deviations for each item position and difficulty level in the orientation judgment task according to the seven age groups in the typically developing group.

Item Position	Difficulty	4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		Adults	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Vertical	Easy	79.8	21.9	91.9	14.7	96.1	8.1	95.6	10.7	99.1	5.4	99.2	3.6	100	0
	Medium	57.1	20.6	72.4	29.7	85.0	22.8	89.5	18.9	96.7	10.3	97	9.9	98.7	5.6
	Hard	41.7	19.3	46.1	15.5	46.6	15.4	52.2	18.6	57.9	16.3	59.1	16.5	65.8	12.6
Horizontal	Easy	73.8	32.5	90.6	15.7	98.7	4.5	98.7	6	99.6	2.7	100	0	100	0
	Medium	64.3	27.2	73.7	30.3	89.1	16	91.4	14.6	96	9.2	96.4	8.8	100	0
	Hard	40.5	15.6	44.9	21.7	51.7	18.6	62.7	19.1	60.5	17.9	60.3	23.3	66.7	13.2
Oblique	Easy	35.1	16.7	60.9	22.1	73.7	20.5	83.1	14.8	86.6	12.3	83.7	15.2	92.9	11.9
	Medium	30.4	11.7	44.5	23.4	59.6	17.5	62.8	18.7	69.4	16.4	65.5	20.4	80.6	14.3
	Hard	37.5	14.1	38	16.7	44.7	15.6	42.1	17.1	44.1	13.4	45.4	16.4	52.5	15.3

Note. Bold numbers indicate accuracy reached ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix D.

Main characteristics of children with Cerebral Palsy

Characteristics	N		N
Age & Gender		Gestational age	
Young (5, 6, 7, 8, 9)	43 (23-20)	≥37 weeks	37
(male/female)		33-36 weeks	21
Motor disorder		28-32 weeks	21
Diplegia	17	<28 weeks	7
Right hemiplegia	27	Birth weight	
Left hemiplegia	25	+2500g	40
Quadriplegia	17	1500-2500g	24
GMFCS		1000-1500g	17
Level I	54	750-1000g	5
Level II	16	Epilepsy	
Level III	9	Yes	17
Level IV	7	No	69
Cerebral lesion		Optalmic disorders	
Right PVL	6	Myopia	9
Right PVL + subcortical lesions	4	Hypermetropia	15
Left PVL	8	Strabismus	30
Left PVL + subcortical lesions	2	Astigmatism	20
Left PVL + cortico-subcortical lesions	2	Amblyopia	3
Bilateral PVL	24	Nystagmus	4
Subcortical lesions	7	Visual fields	2
Cortico-subcortical lesions	15	No impairment	32
No lesion	4	Schooling	
No information	14	Mainstream	63
		Special education	23

Note. PVL = Periventricular Leukomalacia, GMFCS = Global Motor Funtional Classification Scale; Level I = walk without restrictions, Level II= walk with some restrictions, Level III = walk with hand-held level mobility device, Level IV= autonomous powered mobility

Appendix E.

Descriptive statistics: mean percentages of RCO and standard deviations for each difficulty level of the four subtests according to the age-split and the three participant groups.

		Length Easy		Length Medium		Length Hard		Surface Easy		Surface Medium		Surface Hard	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	54.26	18.49	39.38	12.75	32.87	13.98	70.85	20.73	46.82	15.08	31.78	10.37
	old	52.71	19.45	42.17	15.24	37.98	12.97	71.94	21.36	53.02	17.64	33.95	11.89
TDca	young	66.67	21.28	47.29	16.25	34.88	12.67	84.81	18.25	60.16	15.43	34.73	12.89
	old	68.53	19.48	49.15	17.94	34.11	13.19	92.09	8.76	68.06	14.88	37.83	13.86
TDnv	young	58.14	19.43	44.81	16.73	33.95	9.63	82.17	15.98	57.05	19.53	34.42	12.51
	old	65.58	20.52	46.2	15.56	32.4	11.96	88.06	13.53	66.51	19.33	37.83	14.38
		Orientation Easy		Orientation Medium		Orientation Hard		Position Easy		Position Medium		Position Hard	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	68.12	14.34	56.4	15.93	37.6	10.85	84.88	18.27	70.47	19.6	45.47	14.13
	old	71.61	19.72	67.3	15.72	41.47	11.75	86.74	16.69	69.88	22.56	47.33	15.97
TDca	young	80.52	13.23	68.02	18.26	44.57	11.12	91.51	12.27	79.19	15.27	51.16	14.26
	old	91.28	6.97	79.94	10.87	51.94	11.22	98.72	2.69	94.19	5.97	61.28	11.55
TDnv	young	77.81	15.9	63.52	16.98	43.99	11	89.77	15.51	74.3	20.34	45.23	11.65
	old	84.98	12.96	71.22	17.58	45.83	10.95	92.79	12.69	81.86	16.04	56.98	16.26

Appendix F.

Descriptive statistics: median response times and standard deviations for each subtest, namely the length judgment task, the surface judgment task, the orientation judgment task, and the position judgment task according to the age-split and the three participant groups.

		Length		Surface		Orientation		Position	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	3493	2809	2931	1936	1672	2068	1729	2045
	old	4209	2842	3108	2128	1493	1742	1820	1716
TDca	young	3991	2303	2626	1353	2128	1189	1743	783
	old	2929	1311	2383	1067	1675	869	1315	497
TDnv	young	3372	3028	3179	1930	1685	1520	2078	2510
	old	3493	2165	2382	1356	1536	1151	1297	630

Appendix G.

Descriptive statistics: mean percentages of correct responses and standard deviations for each item position and difficulty level in the orientation judgment task according to the age-split and the three participant groups.

		Vertical easy		Vertical medium		Vertical hard		Horizontal easy		Horizontal medium		Horizontal hard		Oblique easy		Oblique medium		Oblique hard	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	89.1	13.5	69.8	26.5	39.9	20.3	86	18.9	72.1	27.9	35.3	25	49.2	20.4	41.6	19.4	37.6	13.6
	old	91.1	16.8	79.1	25.5	43	15.5	88	18.7	83.7	23.1	41.1	22.2	53.7	28.3	53.2	18.5	40.9	15.5
TDca	young	93.4	11	82	25.8	48.1	16.7	95.7	10.3	84.9	24.5	47.7	22.9	66.5	22.7	52.6	22.9	40.9	14.5
	old	98.8	4.3	97.1	9.8	53.5	17.3	99.6	2.5	95.9	9.3	62	20	83.3	14	63.4	19.4	40.9	16.2
TDnv	young	91.5	14.3	76.7	25.8	43.4	13.7	91.5	19.4	79.6	24.5	50	18.2	62.8	22.6	46.8	21	40.9	16.4
	old	95.3	10.5	82.6	25.9	49.2	13.6	96.1	13.5	86	17.5	53.1	19	74.2	21.2	58.1	20.9	40.9	14.8

Note. Bold numbers represent accuracy reaching ceiling level (>95% of correct responses).

OBJECT RECOGNITION IN CHILDREN WITH TYPICAL DEVELOPMENT AND CEREBRAL PALSY: FOCUS ON INTEGRATIVE PROCESSING.

Schmetz E, Magis D, Detraux JJ, Barisnikov K, Rousselle L

In preparation

Abstract

The present study aims to assess integrative visual perceptual processing in two populations of children, one with typical development (TD) and the other with cerebral palsy (CP). Children's figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processing were respectively examined using the overlapping figures, incomplete figures, and hierarchical figures subtests of the battery for the evaluation of visual perceptual and spatial processing (BEVPS). In total, 213 TD children aged between 4 and 14 years, 20 young adults, and 86 CP children aged between 5 and 14 years were examined in two experiments. Experiment 1 showed that in TD children, the three integrative visual processes follow different developmental trajectories. Adult maturity was reached by the age of 9-10 years for the outline drawings in the incomplete figures subtest and by the age of 11-12 years for the overlapping and hierarchical figures subtests; performances improved until adulthood for the silhouette drawings in the incomplete figures subtest. Experiment 2 revealed that the performances of CP children were significantly influenced by difficulty levels and age, with older children exhibiting greater impairment than younger children. Impairments can so be considered to be global and nonspecific in younger children (some processes are impaired in comparison to TD children matched on chronological age), but global and specific in older children (all processes are impaired in comparison to TD children matched on nonverbal reasoning abilities). Impairments were persistent over time for all CP children.

Keywords: child, development, cerebral palsy, visual closure, figure-ground discrimination, local-global processing

INTRODUCTION

Visual perception is rapid and effortless despite resulting from highly complex processes, including low-level processing that enables the coding of basic visual information, and high-level processing that allows different elements in a visual scene to be recognized, their interrelation to be understood, and the subsequent decision to be made as to how to interact with these different elements. Among them, visual object recognition represents one of the most important processes, as it allows us to understand the visual world in which we live and appropriately interact with it in all circumstances.

Studies conducted by Humphreys and Riddoch (1987a, 1987b, 2006, 2008) over the past 30 years have contributed greatly to our understanding of how the visual experience is first decomposed into separate visual features before being subsequently bound into a coherent and meaningful percept of objects. In short, the authors distinguished between *feature processing* that includes basic feature coding and feature binding, and *object processing* that leads to a full-blown representation of objects. Object processing involves: (1) integrative visual processing to form a view-dependent representation of the object, (2) the coding of a view-invariant object representation, and (3) the access to knowledge stored about the objects (i.e., structural and semantic).

Indeed, most of the existing literature on visual object recognition has been conducted in adults, with a large amount of data being collected from brain-damaged adults. However, the way in which cognitive functions are organized and could be selectively damaged in an adult brain that developed in a typical way does not tell us much about how visual perceptual functions develop and build on each other. Brain development goes through a dynamic process made of structural and functional changes that give rise to the emergent adult brain structure at the end state. The study of these changes is supposed to track the entire task-specific developmental trajectories of visual object processing in typical development (TD).

This approach is absolutely necessary to determine how gradual changes occur from early childhood onward and how the different developing processes interact with each other at different points over time in a truly developmental perspective. The establishment of the TD trajectory for a given task could then be used as a reference point to understand the atypical development of a particular process in neuro-developmental disorders and detect any mark of deviance or delay in the specific task (Thomas et al., 2009).

Very little is known about how visual perceptual object processing develops from childhood to adulthood. Regarding feature coding, recent investigations have shown that the processing of length, surface, orientation, and position follows different and separable developmental trajectories in TD depending on the feature of interest (Schmetz, Magis, Detraux, Barisnikov & Rousselle, under revision). Moreover, children with cerebral palsy (CP) have been found to have poorer performances than their typically developing peers in the processing of each of these basic visual features. Such studies that contrast the typical and atypical development of visual perceptual processing using the same tasks bring critical information about how basic visual perceptual processes develop. A simple deficit could thus be assumed to be the source of CP children's subsequent visual perceptual disorders.

This paper will focus on the next step, that is, on the three integrative visual perceptual processes leading to the formation of a view-dependent representation of the object. The first process is *figure-ground discrimination*, which requires participants to group the features belonging to each object and segment the features belonging to other objects found in a visual scene (Humphreys & Riddoch, 2006; Riddoch et al., 2008). Figure-ground discrimination abilities are usually assessed using overlapping figures tasks in which several overlapping outline drawings of everyday objects or shapes have to be segregated and recognized. The second process is *shape integration* (Humphreys & Riddoch, 2006), which allows the elementary perceptual features to be grouped together and integrated to form identifiable shapes. This is also known as *visual closure* (Wang, Doherty, Rourke, & Bellugi, 1995) or perceptual grouping process (Farran, 2005). It is usually examined in incomplete figures tasks in which participants have to identify the object corresponding to the degraded picture of an item, with some of its salient features being occluded (Biederman, 1987). The third and final process involved in integrative visual perceptual processing leads to the *formation*

of holistic and part-based representations (Humphreys & Riddoch, 2006) and is usually assessed using hierarchical figures (Navon, 1977), which examine the ability to code local and global features separately.

Visual perceptual integrative processing in typical and atypical development

Studies that address the development of these integrative visual perceptual processes are rather sparse. Yet such processing is essential to understand the complex visual scenes with which we are constantly confronted in everyday life and which often contain objects that are partially covered or even embedded in each other. There is currently no information about the typical sequence of development of these three integrative processes, so it is unknown whether they develop simultaneously, sequentially, or slightly shifted in time. Aside from the general interest of such developmental data, the typical developmental sequence can also shed light on the nature of visual perceptual impairments associated with neurodevelopmental disorders such as Williams syndrome (Jannette Atkinson et al., 1997; Bellugi et al., 2000; Porter & Coltheart, 2006), Down syndrome (Porter & Coltheart, 2006; Wang et al., 1995), cerebral visual impairment (Chokron, 2015; Lueck, 2015), and CP (Fazzi et al., 2004, 2009, 2012; Stiers et al., 2001, 2002). The precise characterization of the visual perceptual developmental profile of these children is the only way to understand the nature of their visual perceptual pathology and provide them with the best adaptations in their everyday life and education.

The present study focuses on CP children who are known to be particularly vulnerable to visual perceptual disorders (Fazzi et al., 2004, 2009, 2012; Stiers et al., 2001; Stiers, Vanneste, Coene, & Vandenbussche, 2002; for a review, see Schmetz & Rousselle, 2016). CP can be defined as a group of permanent disorders of the development of movement and posture consecutive to non-progressive lesions in the developing brain. Most of the time, these motor disorders are associated with cognitive, intellectual, perceptual, and/or communicative disorders (Rosenbaum et al., 2007).

In the literature, figure-ground discrimination was assessed in TD children using naming (Amador-Campos & Kirchner-Nebot, 1997; Ghent, 1956; Vilayphonh et al., 2009) and matching tasks (Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007; Ghent, 1956; Lachance & Mazzocco, 2006), which showed a significant improvement of accuracy between 4 and 11 years. However, no study has examined the entire development of this process from childhood to adulthood. In children with CP, many studies using naming, matching, or pointing tasks confirmed that figure-ground discrimination is impaired in comparison with TD children at different time points (Barca et al., 2010; Cobrinik, 1959; Dolphin & Cruickshank, 1951; Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; Schmetz et al., 2013; Stiers et al., 2002), but none of the studies contrasted age groups to provide a more complete picture of the persistence of figure-ground discrimination impairments until adulthood.

Visual closure has been examined in children of similar age groups as with figure-ground discrimination. This integrative process was assessed using naming and matching tasks of incomplete drawings that represented geometric shapes (Lachance & Mazzocco, 2006; Nayar, Franchak, Adolph, & Kiorpes, 2015) or everyday objects (Bova et al., 2007; Chikhman, Shelepin, Foreman, Merkuljev, & Pronin, 2006; Stiers et al., 2001), showing a significant improvement of accuracy between 3 and 11 years.

Visual closure has also been studied in children with CP of various types (spastic, dyskinetic, and mixed) and with motor disorders (hemiplegic, diplegic, and quadriplegic), all of whom show significant deficits in comparison with TD children with regard to naming tasks using drawings of everyday objects (Fazzi et al., 2009; van den Hout et al., 2004) and matching tasks using geometric figures (Fazzi et al., 2004; Menken et al., 1987).

Lastly, local-global processing has been assessed in TD children using a forced choice task (instructions to choose either global or local stimuli), a free choice task (instructions to choose the drawing that most resembles the model based on first impressions), and copying of Navon-type hierarchical figures (Navon, 1977). Many developmental studies (Harrison & Stiles, 2009; Kramer, Ellenberg, Leonard, & Share, 1996; Poirel et al., 2011; Poirel, Leroux, Pineau, Houdé, & Simon, 2014; Poirel, Mellet, Houdé, & Pineau, 2008; Scherf, Behrmann, Kimchi, & Luna, 2009), using one of these three types of responses, showed a shift from local to global preference in children at

around the age of 6 years. Before this age, children used strategies of local sampling of visual information processing. Between 6 and 9 years, children showed a progressive transition from local to global preference. From 9 years to adulthood, children made an exhaustive global exploration of the visual stimuli with more exploratory eye movements. Local-global processing has also been studied in CP children compared with TD children, but only in a few studies (Schmetz et al., 2013; Stiles, 2000), which showed significant deficits but did not assess the development of this process in CP children.

Methodological Limits

A wide variety of methodologies has been used in studies on figure-ground discrimination in terms of response modalities (naming vs matching), drawing types (object, non-object, and geometric overlapped drawings), overlapping degrees, and number of overlapped drawings. Yet these stimulus characteristics have only been studied in a few cases. The overlapping degrees (from completely overlapped to separate drawings) and the number of overlapped drawings (two to seven drawings per item) vary in the different studies with TD and CP children (Barca, Cappelli, et al., 2010; Cobrinik, 1959; Dolphin & Cruickshank, 1951; Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; Schmetz et al., 2013; Stiers et al., 2002). These studies use different overlapping degrees and an increasing number of overlapped drawings to vary the task difficulty, and therefore show better age sensitivity, but they regroup all items into a global score and thus never analyze the children's accuracy according to the different difficulty levels.

As with figure-ground discrimination, a variety of methodologies has been used in studies assessing visual closure in terms of response modalities, drawing types, degradation types and percentages, and filling of drawings. In the "drawings occluded by noise" of the L94 battery, Stiers et al. (2002) presented children with drawings occluded by noise ranging from 60% occlusion to 0%, but they regrouped all items into a global score, making it impossible to distinguish the effect of degradation percentages on the accuracy of TD and CP children. Chikhman et al. (2006) used a task varying between 100% and 0% occlusion and determined the larger percentage of degradation admitted for recognition in TD children. These studies used decreasing percentages of

degradation to vary the task difficulty and thus show better age sensitivity, but only the study of Chikhman et al. (2006) analyzes the accuracy of TD children based on these percentages. Therefore, to our knowledge, no study to date has assessed the effect of degradation location on the accuracy of TD children compared with CP children.

Finally, diverse methodologies have also been used in studies examining local-global processing (Harrison & Stiles, 2009; Kramer et al., 1996; Poirel et al., 2011, 2014, 2008; Scherf et al., 2009) in terms of response modalities, drawing types, number and size of local parts in the global shape, and the use of reaction times (RTs). Different response modalities were proposed to TD and CP children in various studies but none studied the effect of forced versus free choice and copying on children's accuracy, while comparing these three modalities. Geometric shapes, objects, and non-objects were proposed to children. Poirel et al. (2008) showed a significant effect of implicit identification processes on local-global processing, with objects being better discriminated than non-objects and having the same developmental bias as geometric shapes. Further, a local preference was found in 4-5-year-olds but a global preference in 6-9-year-olds.

Nevertheless, none of these studies assessing the three integrative visual perceptual processes considered their development from childhood to adulthood whether in TD or CP children.

Present Study

In 2009, Thomas et al. proposed a tutorial on how to use developmental trajectories to understand cognitive impairments in developmental disorders. The authors specified that developmental trajectories may be constructed on the basis of data collected either longitudinally or at a single time point in a cross-sectional sample of individuals varying in age and/or ability (or a combination of both methods). They further specified that examining the complete developmental trajectory of a cognitive process requires for the task to be conceived from a developmental perspective. In other words, the task must make it possible to demonstrate clear changes across different age groups, that is, from very young children to older children, adolescents, and adults (thereby avoiding floor and ceiling effects). Moreover, the authors also argued that the task must be able to detect subtle impairments, which supposes that it must remain sufficiently sensitive

from childhood to adulthood. Designing a sensitive task for different age groups thus requires carefully varying the difficulty levels that could influence the tasks, the number of drawings per item, the overlapping degrees, the degradation types, the drawing types, and the response types. Finally, the performance trajectory of children in the disorder group (performance in the task plotted as a function of chronological age) can then be compared to the typically developing trajectory. At present, such a comparison has never been made with regard to integrative visual perceptual processing in children with CP.

Accordingly, two issues that respectively concern the typical and atypical development of integrative visual perceptual processing were addressed in two cross-sectional experiments. Experiment 1 examined the typical developmental trajectory of integrative visual perceptual processing, while Experiment 2 investigated how integrative visual perceptual processing develops in children with CP aged between 5 and 14 years. In both experiments, figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processing were respectively examined using the overlapping figures, incomplete figures, and hierarchical figures subtests of the battery for the evaluation of visual perceptual and spatial processing (BEVPS) (Schmetz, Rousselle, Ballaz, Detraux, & Barisnikov, 2017). In each task, the level of difficulty was manipulated to catch the entire developmental curve: the number of drawings presented in the overlap as well as the overlapping percentage were manipulated in the overlapping figures subtest; the type of drawing and the location of the degradation were varied in the incomplete figures subtest; the type of processing (local vs global) and the local-global processing congruity were modified in the hierarchical figures subtest.

EXPERIMENT 1

In Experiment 1, we first aimed to investigate the typical developmental course of the three integrative visual perceptual processes from childhood to adulthood. Our research questions are thus threefold: (1) At what age do the integrative visual perceptual processes reach maturity? (2) Do these different processes follow independent or similar developmental trajectories in TD children? (3) In TD, what is the impact of difficulty levels on children's performances?

Methods

Participants

A total of 213 TD children aged between 4 and 14 years as well as 20 adults aged between 20 and 25 years took part in the experiment. Participants were recruited in the Walloon Region (Belgium) through advertisements. They all were native French speakers. Participants were selected based on the following exclusion criteria: the presence of a neurodevelopmental disorder (including cerebral visual impairment) or medical pathology causing school absenteeism, grade repetition, learning disability, or an uncorrected eye disorder. Children were enrolled in primary school and the first two years of secondary school. Among the adult group, ten held a secondary education diploma, while the remaining ten had reached higher education. The majority of children and adults were Caucasian with middle to high socioeconomic status. This experimental protocol was set up in compliance with the Declaration of Helsinki and was approved by the ethical committee of the Faculty of Psychology (University of Liège). Informed consent was obtained from the children, their parents, and the adults. All developmental and medical data were collected using a questionnaire completed by the parents or adults. The participants were split into seven age groups as defined in Table 1.

Table 1.

Distribution of typically developing children and adults (outliers have already been removed).

Age	Total (n female-n male)	Mean age (years;months)
4 years	15 (7-8)	4 years 6 months [4;1 – 4;11]
5-6 years	36 (18-18)	5 years 11 months [5 – 6;11]
7-8 years	39 (20-19)	7 years 11 months [7 – 8;11]
9-10 years	40 (20-20)	9 years 10 months [9 – 10;11]
11-12 years	38 (20-18)	12 years 0 months [11 – 12;11]
13-14 years	40 (10-10)	14 years 0 months [13 – 14;11]
Adults	18 (9-9)	21 years 11 months [20 – 25]

Apparatus

As described in Schmetz et al. (2017), children visualized the tasks on a laptop with a 15.6-inch screen. Responses were recorded with the software Superlab © 4.5 (Cedrus Corporation, San Pedro- USA). A screen displayed a fixation point in the center for 1200 ms before the presentation of each item. Children had access to three switches measuring 6 cm in diameter (yellow left, blue middle, and red right) fixed on a wooden support in front of the computer to avoid sudden movements in the responses.

Materials

Figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processing were respectively assessed using the overlapping figures, incomplete figures, and hierarchical figures subtests drawn from the BEVPS (Schmetz et al., 2017), a battery specifically designed to examine TD children as well as children with neurodevelopmental disorders associated with restricted responses. Examples of the subtests are presented in Appendix A.

Overlapping Figures

This subtest is a naming task inspired by the BORB battery (Humphreys & Riddoch, 1993) in which items belonging to four different semantic categories (utensils, furniture, clothing, and animals) were selected based on the ability of 5-year-old children to name these everyday objects or animals (success rate was between 95% and 100% for the selected pictures; see Cannard et al., 2006). This subtest assessed the ability to discriminate the figure from the ground. Children were presented with two, three, or four overlapping black outline drawings on a white background and were asked to name the different objects presented in the overlapping figures. The task started with 12 items presenting figures with a full overlap, followed by 12 items with a partial overlap, and ending with 12 items presenting contiguous figures with no overlap (contiguous outline). For each overlapping level, children were presented with two, three, and then four figures each with four items.

Incomplete Figures

Inspired by Bierdermann's work (1987), this subtest assessed the visual closure of objects, that is, the ability to form a coherent global perception based on an object's local features. Items belonging to four different semantic categories (utensils, furniture, clothing, and animals) were selected based on the ability of 5-year-old children to name these everyday objects or animals (success rate was between 95% and 100% for the selected pictures; see Cannard et al., 2006). Children were asked to recognize and name non-living and living objects depicted by a white image with a contrast degradation of 50% on a black background. This subtest was divided into two tasks of 30 items in a counterbalanced order across participants. Two distinct series of stimuli were successively presented, namely white outline drawings and white silhouettes. The image degradation was either on the prototypical parts (e.g., an airplane wing), the intersections, or the middle of the segments (for the easiest items). As evidenced by Biederman (1987), the differential effect of difficulty on children's accuracy (i.e., recognizing items degraded on the prototypical parts was more difficult than recognizing those degraded on the intersection and then middle parts) confirms the importance of informative features for object recognition. Each task began with ten items degraded on the prototypical part, followed by the same ten items degraded at the intersections, and then ten degraded in the middle. Within each subset, items were presented randomly.

Hierarchical Figures

This matching subtest inspired by the study of Navon (1977) assessed the global or local perceptual processing strategy (global or local) used to identify forms. Children were presented with a series of local elementary shapes arranged to form a global geometric figure. The subtest was divided into two identification tasks in which children had to select from among three possibilities the shape corresponding to either the local constitutive elements (local identification task) or the global shape of the stimuli (global identification task). Figures consisted of simple (rectangle, square, triangle, circle, and ellipse) and complex geometric shapes (diamond, star, cross, hexagon). Local and global identification tasks were administered in a counterbalanced order across participants. Each task comprised 30 items presented in a random order, half of which were incongruent with the local and global features corresponding to different shapes

(e.g., a square made of triangles), while the other half were congruent with local and global features referring to the same shape (e.g., a square made of squares). The random presentation of these two types of items allows the difficulty to be varied to prevent the child from developing a strategy to systematically inhibit the irrelevant level (global feature in the local identification task and vice versa).

One point was given for each correct response. Response latencies were recorded in milliseconds. Nevertheless, congruent items were not analyzed, because they do not allow the child's level of treatment (i.e., local or global) to be discriminated, as in the study of Poirel et al. (2008).

Control Task: Reaction Time Subtest

The reaction time subtest is a matching task used to measure the general processing speed required to provide a manual motor response using the switches. These individual motor response latencies were used to control for differences in the inter-individual general processing speed in the matching tasks. Children were presented with 24 target colored geometric shapes (e.g., circle, arrow, rectangle, cross) and were asked to select the identical stimuli from among three possibilities. The distractors were highly distinguishable from the targets, as they differed in shape, size, and color to minimize perceptual processing. As in the other matching tasks of the battery, stimuli were left in full view with no imposed time limit.

Control Task: Picture-Naming Subtest

In the picture-naming task, children were asked to name 45 black outline drawings of objects and animals presented in the battery. The aim of this task was to ensure that the children knew the names of the pictures used in the different subtests without any additional perceptual processing requirements. All the children completed this task successfully (between 97 and 100% of correct responses), given the simplicity of the drawings.

Procedure

Children were tested individually in a quiet room. The order of the subtests was counterbalanced across participants. However, the testing session always started with the reaction time subtest to allow the children to become familiarized with the equipment, and ended with the picture-naming subtest. Each naming and matching subtest started with two practice trials that presented the easiest items to ensure that the children understood the instructions and requirements of the task. No feedback was provided during the test: children were autonomous in providing answers, but they were regularly encouraged to maintain their attention on the task.

Results

Participants with z-scores less than three standard deviations below the age-group mean in one of the three tasks were considered to be outliers. Seven participants met this criterion in one or more task and were thus removed from all analyses. All computations were performed using the R software (R Core Team, 2016) and Statistica 13 software. Mean accuracy data, standard deviations of the three subtests, and median RTs of the hierarchical figures subtest are reported by age group and difficulty levels in Appendix B. Accuracy and RT data did not fit a normal distribution despite the fact that they were subjected to natural logarithm transformations. Accordingly, data were analyzed using non-parametric statistics. Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were carried out per age class on both correct response percentages for each difficulty level of the different subtests and on the median RTs (based on correct responses only) of the hierarchical figures subtest. When statistically significant differences were detected, multiple post-hoc comparisons were performed between the adult age class and every other age class using the Wilcoxon rank-sum test and multiple comparison adjustments using Benjamini and Hochberg's approach (Benjamini & Hochberg, 1995). Moreover, Friedman tests (with a significance level of 5%) were carried out on correct response percentages per difficulty level. It should be noted that the median RTs of the hierarchical figures subtest are based on correct responses alone and subject to transformation while controlling for global processing speed differences using the following formula: (RT subtest – RT control task).

Finally, gender effect was assessed in each task using Mann-Whitney tests for the accuracy, RTs, and error analyses, but this effect was never significant ($ps > .05$).

Overlapping Figures

Accuracy. A ceiling effect (percentage of correct responses equal to or greater than 95%) was present in the partially overlapped drawing and contiguous drawing trials in the age groups of 5-6 years and 4 years, respectively. Hence, these trials were not considered in the following analyses. A Friedman test conducted on the completely overlapped drawings yielded significant differences between the different number of drawings per item (two, three, or four overlapped drawings), $\chi^2 = 130.34$, $p < .001$ with less accuracy in the trials with four drawings compared to three drawings, with the results of both being lower than the trials with two drawings ($ps < .05$). Kruskal-Wallis tests were conducted to assess the effect of age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, Adults).

As shown in Figure 1, accuracy significantly increased across ages in the two-drawing, $H(6) = 99.66$, $p < .001$, three-drawing, $H(6) = 90.20$, $p < .001$, and four-drawing trials, $H(6) = 86.03$, $p < .001$. From the age of 9-10 years and older, children's performances did not show any significant difference compared to adults' ($ps > .10$) in the two- and three-drawing trials, while an absence of significant difference was observed from the age of 11-12 years in the four-drawing trials ($ps > .10$).

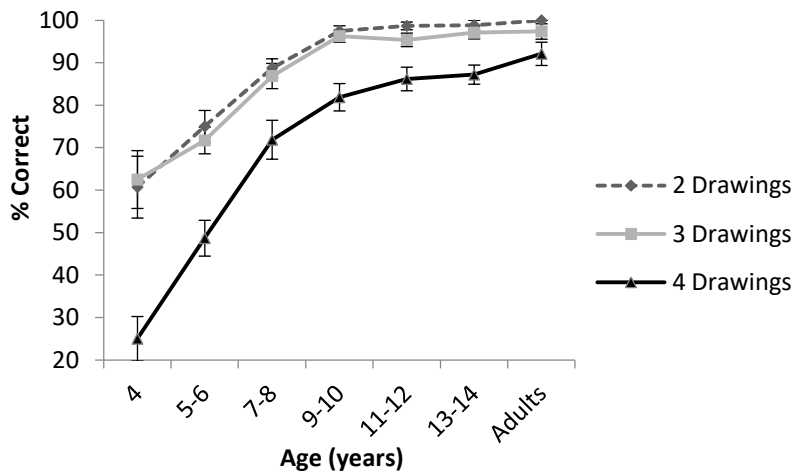


Figure 1. Correct response percentages in the overlapping figures subtest by age and number of drawings. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

Incomplete Figures

Accuracy. Friedman tests showed lower accuracy for silhouettes compared to outline drawings, $\chi^2 = 168.28$, $p < .001$, and a significant difference between the types of image degradation, $\chi^2 = 354.06$, $p < .001$. Prototypical degradation showed lower accuracy than degradation at the intersections, with both types of degradation yielding lower accuracy than middle-part degradation ($ps < .001$). Kruskal-Wallis tests showed a significant effect of age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, Adults) for each difficulty level.

As shown in Figure 2, silhouettes and outline drawings showed a significant increase in accuracy across age for degradations in prototypical parts, $H(6) = 117.61$, $p < .001$, $H(6) = 78.51$, $p < .001$, in intersection parts, $H(6) = 108.61$, $p < .001$, $H(6) = 95.96$, $p < .001$, and in middle parts, $H(6) = 103.86$, $p < .001$, $H(6) = 94.21$, $p < .001$, respectively. From the age of 9-10 years, children's performances did not significantly differ from adults' in terms of the intersection and middle parts of outline drawings, and from 11-12 years in terms of the intersection and middle parts of silhouettes and the prototypical parts of outline drawings ($ps > .10$). Significant differences between child and adult

performances still persisted at 13-14 years in the prototypical parts of silhouette drawings ($p < .001$).



Figure 2. Correct response percentages in the incomplete figures subtest for the (a) silhouette drawing task and (b) outline drawing task by age and type of degradation. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

Hierarchical Figures

Accuracy. The pairwise Wilcoxon test conducted on the percentages of correct responses did not show any significant difference between the local and global processes, $Z = 1.89$, $p = .06$, with the accuracy of local trials being comparable to global trials. As shown in Figure 3, Kruskal-Wallis tests showed a significant effect of age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, Adults) in the local, $H(6) = 47.51$, $p < .001$, and global trials, $H(6) = 50.54$, $p < .001$. From 11-12 years onward, children's performances did not significantly differ from those of adults ($ps > .10$) in both local and global trials.

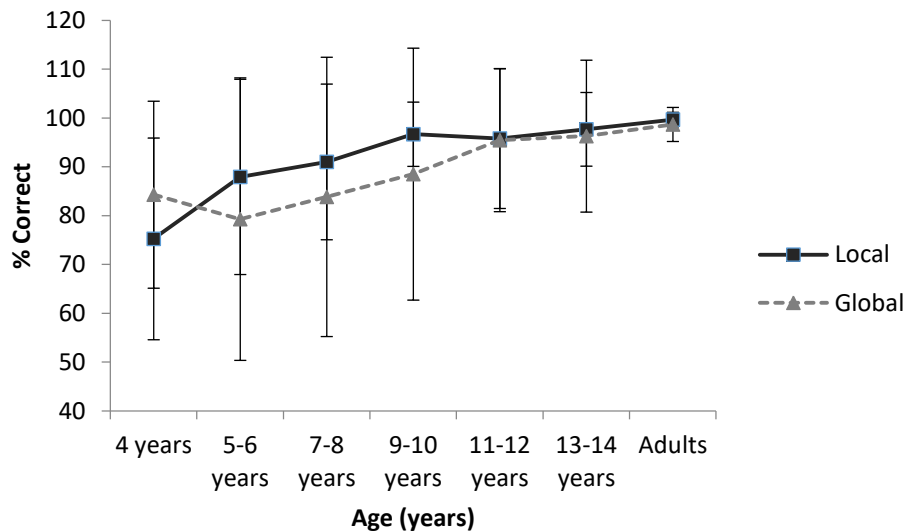


Figure 3. Correct response percentages in the hierarchical figures subtest by age and type of degradation. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

RTs. The pairwise Wilcoxon test conducted on median *RTs* yielded no significant difference between the local and global processes ($Z = 0.37$, $p = .71$). Kruskal-Wallis tests showed a significant effect of age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14, Adults) in both local ($H(6) = 69.001$, $p < .001$) and global trials ($H(6) = 53.78$, $p < .001$). From 11-12 years onward, children's *RTs* did not show any significant difference from adults' ($ps > .10$) in both local and global trials.

Discussion

The aim of this first experiment was to examine the typical development of the three integrative visual perceptual processes from childhood to adulthood. We tested 4- to 14-year-old children and young adults using three subtests of the BEVPS to specify developmental trajectories of figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processing.

Results showed a significant improvement of accuracy across age groups for the different perceptual processing components assessed. However, young children from the age of 5 years already performed at the ceiling level for partially overlapped

drawings and contiguous drawings, meaning that the subtests were too easy, even for the youngest children. These items were thus of no help in discriminating between participants regardless of their age. In the overlapping figures subtest, the use of different difficulty levels allowed us to refine the developmental curve of the figure-ground discrimination process. For completely overlapped drawings, accuracy reached adult maturity by the age of 9-10 years for trials with two and three overlapped drawings and by the age of 11-12 years old for four overlapped drawings. Consistent with our results, the studies of Bezrukikh and Terebova (2009), Bova et al. (2007), and Stiers et al. (2001) showed a significant improvement of accuracy with age in their respective samples of 3- to 6-year-old children with the overlapping line drawings naming task of the L94 (Stiers et al., 2001), 5- to 7-year-old children with an adaptation of the figure-ground matching subtest of the DTVP II, and 6- to 11-year-old children with the Poppelreuter-Ghent matching test.

In the incomplete figures subtest, the entire developmental trajectory of visual closure processes can be characterized using different types of stimuli and varying the location of the degradation. Easy levels of outline drawings better discriminated accuracy among younger participants, but did not differentiate the performance of adolescents and adults. Nevertheless, hard levels of silhouette drawings better discriminated the performances of adolescents and adults, but proved to be too complicated for younger children. Accuracy improved until the age of 9 years for outline drawings degraded at the intersections or middle parts, but adult maturity was only reached at the age of 11 years in drawings degraded on the prototypical parts. However, a ceiling effect (accuracy equal or higher than 95%) was observed in outline drawings degraded at the intersections or middle parts from 7 years onward. Hence, these levels provided little additional information about the typical development of visual closure processing.

With silhouette drawings, accuracy reached adult maturity by the age of 11 years when drawings were degraded at the intersections or middle parts, while it still continued to increase between 13-14 years and adulthood for silhouette drawings degraded on the prototypical parts. These results complement those of Stiers et al. (2002) who showed a significant improvement of accuracy in the picture completion task with outline drawings ("line drawings occluded by noise", L94 Battery) in their sample of 3- to 6-year-old children. Furthermore, Chikhman et al. (2006) studied the minimal amount of contour required for correct object recognition, showing a great inter-individual

variability ranging from 4 to 25% of the contour required for recognition (mean of 12.5%) of canonical images of everyday objects or animals. This may explain the ceiling effect present from the age of 7 years, because our figures were degraded at 50% of the total contour. With the street completion test (a task requiring the naming of the incomplete silhouette figures of everyday objects), Bova et al. (2007) showed a significant improvement of accuracy between 6 and 11 years as well as a possible maturation of visual closure after the age of 11 years to reach adult-level performances.

In the hierarchical figures subtest, accuracy was comparable in local and global processes in all age groups. Our results did not show any significant difference between local and global performance, perhaps due to the fact that our task was too easy even for young children, whereas many authors used various free-choice tasks to highlight a shift from local to global processing in children between 6 and 10 years of age (Harrison & Stiles, 2009; Kramer et al., 1996; Poirel et al., 2011, 2014, 2008) or later in adolescence (Scherf et al., 2009). Consistent with other data showing that accuracy increases between 4 and 9 years (Poirel et al., 2008) but no longer progresses from 8 years until adolescence (Scherf et al., 2009), our results indicate that performance reached adult maturity by the age of 11 years both in terms of accuracy and RTs. No gender effect was shown in the overlapping figures, incomplete figures, and hierarchical figures subtests that assess the three integrative visual perceptual processes. This absence of effect is consistent with many studies (Harrison & Stiles, 2009; Kirchner & Nebot, 1988; Lachance & Mazzocco, 2006; Nayar et al., 2015; Scherf et al., 2009) assessing figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processes. In only a few studies, boys had better performances than girls in figure-ground discrimination (Amador-Campos & Kirchner-Nebot, 1997; Kramer et al., 1996).

Interestingly, performance varied along with the difficulty levels, thus making the task more discriminant for certain age ranges as suggested by Thomas et al. (2009). For example, in the incomplete figures subtest, easy outline drawings better discriminated accuracy among younger participants, but were too easy for adolescents and adults and therefore did not discriminate between them. By contrast, difficult silhouette drawings better discriminated the performances of adolescents and adults, but were too complicated for younger children.

In the overlapping figures subtest, young children from 5 years already performed at the ceiling level for partially overlapped and contiguous drawings, thus indicating that the subtests were too easy, even for the youngest children. For this reason, it is important to select items of varying difficulty levels according to the age of the children in order to optimally assess the different processes loading to the integrative level of analysis.

To sum up, this first study highlighted distinct developmental trajectories for the different integrative visual perceptual processes spanning from childhood to adulthood depending on the tasks and stimuli under consideration. As summarized in Table 2 below, figure-ground discrimination and local-global processing reached maturity by the age of 11-12 years, while visual closure seemed to develop on a more extended developmental window depending on the type of stimuli and location of the degradation.

Table 2.
Age of maturity in the three subtests presented by difficulty level.

Subtest	Difficulty	Age groups
Overlapping figures	Complete: 2 drawings	9-10
	Complete: 3 drawings	9-10
	Complete: 4 drawings	11-12
Incomplete figures	Outline: middle	9-10
	Outline: intersection	9-10
	Outline: prototypical	11-12
	Silhouettes: middle	11-12
	Silhouettes: intersection	11-12
Hierarchical figures	Silhouettes: prototypical	Adult
	Local	11-12
	Global	11-12

Based on these distinct typical developmental trajectories, Experiment 2 will be conducted using the same three subtests to examine how children with CP processed the integrative visual perceptual dimensions. Indeed, CP children are known to experience deficits in figure-ground discrimination (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; Schmetz et al., 2013), visual closure (Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; Schmetz et al., 2013; van den Hout et al., 2004), and local-global processing (Schmetz et al., 2013), but the developmental trajectory of integrative visual perceptual processing has never been characterized as a whole. Experiment 2 was conducted to draw the complete developmental curve of children with CP as a function of their chronological age using sensitive tasks and to compare their trajectory with that of TD children.

EXPERIMENT 2

In Experiment 2, we aimed to provide a systematic assessment of the three integrative visual perceptual processes in children with CP to determine whether their defective visual perceptual cognition could be rooted in a selective or even a global integrative visual perceptual dysfunction. CP children will be compared with TD children matched on chronological age (TDca) and nonverbal reasoning abilities (TDnv) in order to verify whether the resulting deficits go beyond the limit of their nonverbal intellectual abilities. If the deficits of CP children compared to TDca children result from the former's lower intellectual abilities, children would be expected to exhibit similar performances as TDnv children. Conversely, if they present a specific visual perceptual impairment that exceeds their possible intellectual limitations, they should perform worse than TDnv children as well. Finally, to determine whether the impairments reflect a simple developmental delay, a delay appearing with age, or persistent deficits increasing or decreasing with age, the influence of age on visual perceptual impairments was considered by contrasting the developmental curve of the CP and TDca groups.

Methods

Participants

As in Schmetz et al. (under revision), the clinical population comprised 86 children with spastic CP aged between 5 and 14 years who were selected from a larger sample of 108 children with CP who all suffered from prenatal or perinatal brain damage whether due to premature birth or not. Children were native French speakers and predominantly Caucasian, with middle to high socioeconomic status. Our sample has the following main characteristics (described in Appendix C). Among motor disorders, 20% of children present diplegia and 20% quadriplegia, while about 30% present right hemiplegia and 30% left hemiplegia. In 80% of cases, children can walk with or without some restrictions, while the remaining 20% of children deambulate with a mobility device (hand-held or powered). More than half of children were born prematurely of whom 43% were very preterm and 14% extremely preterm. Low birth weight was observed in 54% of children, of whom 37% had a very low birth weight, and 11% an extremely low birth weight. Epilepsy is absent in 80% of children. Two-thirds present one or more neuro-ophthalmological disorders such as strabismus (39%) and astigmatism (26%). Lastly, two-thirds are enrolled in mainstream schooling. The exclusion criteria were the presence of a head injury, meningitis, epileptic encephalopathy, or abnormal cerebral development (e.g., neuronal migration disorder, corpus callosum agenesis). However, children both with and without mental retardation were included provided that they successfully completed the two control tasks (see Experiment 1): matching basic geometrical shapes with different shapes, colors, and sizes, and naming everyday objects and animals. All children with CP who met the inclusion criteria were recruited in the reference and rehabilitation centers specialized in CP in the Walloon Region and Brussels (CIRICU-Liège, CIMC, and CBIMC -Belgium). Participants were included in the study after obtaining the informed consent of the children and their parents. Information about each child's medical history was obtained from medical records. In addition, parents or caregivers filled in a questionnaire with developmental and medical information. The experimental protocol was set up in compliance with the Declaration of Helsinki and approved by the ethical committee of the Faculty of Psychology (University of Liège).

Each child with CP was individually matched with two TD children who took part in Experiment 1, one matched for chronological age (± 1 month) and the other for nonverbal mental age as assessed using the Progressive Matrices of Raven (no more than 1 point raw score difference within the matching pair). This matching procedure led to the constitution of two groups of TD children: one group of 86 TD children matched for chronological age (TDca group, 47 females, mean age = 115.5 ± 36.04 months [5 years – 14 years 11 months], Raven mean raw score = 34.17 ± 11.92) and one group of 86 TD children matched for nonverbal reasoning abilities (TDnv group, 47 females, mean age = 95.77 ± 30.89 months [4 years 1 month – 14 years], Raven mean raw score = 28.95 ± 9.81). As expected, children with CP (44 females, mean age = 115.58 ± 36.19 months [5 years – 14 years 11 months], Raven mean raw score = 29.08 ± 9.73) differed from the TDnv group in terms of chronological age, $t(85) = 3.861$, $p < .001$, but not from the TDca group, $t(85) = -0.159$, $p = .87$. Conversely, they differed from the TDca group in terms of nonverbal reasoning, $t(85) = -3.069$, $p = .002$, but not from the TDnv group, $t(85) = -0.107$, $p = .91$.

Materials, Tasks and Stimuli, and Procedure

The materials, tasks and stimuli, and procedure were exactly the same as described in Experiment 1.

Results

All computations were performed using the R software (R Core Team, 2016) and Statistica 13 software. Mean percentages of correct responses, median RTs, and standard deviations are reported in Appendix D according to group, difficulty level, and subtests. Two sets of analyses were performed on the data: (1) group effect analyses aiming to examine the group differences in each task, and (2) the developmental analyses comparing the developmental curves in the CP and TDca groups to examine the persistence of integrative visual perceptual impairments across development.

Group Effect Analysis

As in Experiment 1, accuracy, RTs, and error data did not fit a normal distribution despite the data being subjected to different types of transformations. Hence, data were analyzed using non-parametric statistics.

First, Friedman and Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were carried out to respectively test the effects of difficulty and group on correct response percentages for each difficulty level of the three subtests. Considering that the effects of difficulty and group might be influenced by age, a median-split procedure based on age was applied to split the sample of children with CP into two groups contrasting younger (5 to 9 years) and older children (9 to 14 years).

Second, Friedman and Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were conducted on median RTs using the formula (RTs of the subtest – RTs of the control task) while controlling for global processing speed differences in order to separately test the effect of difficulty level, group (CP, TDca, TDnv), and age (young, old) in the hierarchical figures subtest.

Overlapping Figures

Accuracy. As in Experiment 1, a ceiling effect (percentages of correct responses equal to or greater than 95%) is present in the partially overlapped drawings (TDca and TDnv children) and contiguous drawings of the subtest (three child groups). Hence, these two parts are not considered in the following analyses. In the completely overlapped drawing part, a Friedman test resulted in lower accuracy because of the higher number of drawings, $\chi^2 = 182.24$, $p < .001$, as the trials with two and three drawings had higher accuracy than those with four drawings ($ps < .001$). Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), showed a significant increase in accuracy between young and old children in the two-, $Z = -4.11$, $p < .001$, three-, $Z = -5.75$, $p < .001$, and four-drawing trials, $Z = -5.58$, $p < .001$. As depicted in Figure 4, separate Kruskal-Wallis tests were conducted to assess the group effect (CP, TDca, TDnv) in the different difficulty levels and age-split groups. In the two-drawing trials, children with CP showed comparable accuracy as TDca and TDnv children in the young group, $H(2,129) = 2.69$, $p = .26$, but lower accuracy than TDca children in the old group, $H(2,129) = 16.7$, $p < .001$. In the three-drawing trials, children with CP showed lower

accuracy than TDca children in the young group, $H(2,129) = 6.18$, $p = .04$, but comparable accuracy as TDca and TDnv children in the old group, $H(2,129) = 5.35$, $p = .07$. Lastly, in the four-drawing trials, children with CP showed lower accuracy than TDca children in the young group, $H(2,129) = 11.79$, $p = .002$, as well as lower accuracy than TDnv children in the old group, $H(2,129) = 14.98$, $p < .001$.

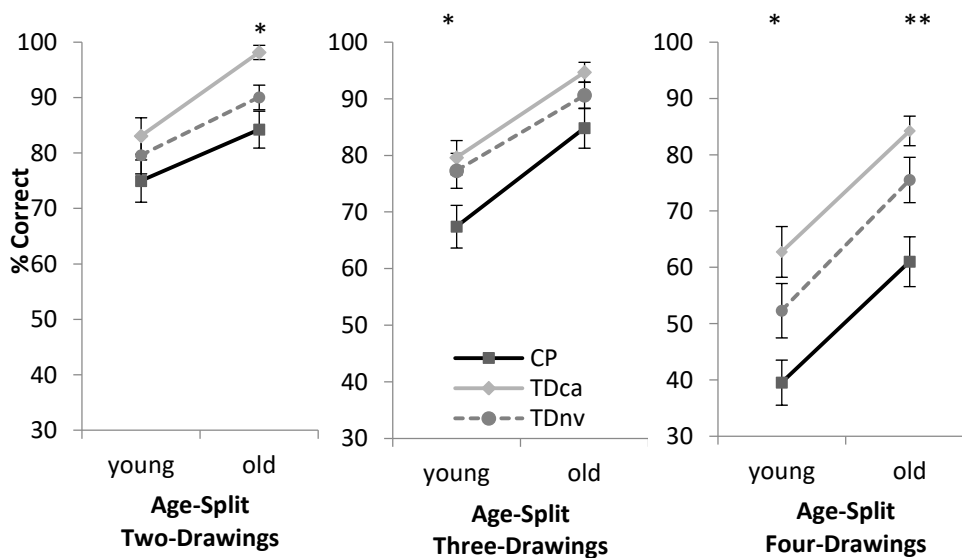


Figure 4. Correct response percentages in the overlapping figures subtest by age-split groups and number of drawings. Standard errors are represented in the figure by error bars attached to each point.

* represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP and TDca children.

** represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP, and TDca and TDnv children.

Incomplete Figures

Accuracy. The Wilcoxon test conducted on percentages of correct responses yielded lower accuracy in silhouette drawings than in outline drawings, $Z = 13.244$, $p < .001$. Friedman tests revealed significant differences between the types of image degradation in silhouette, $\chi^2 = 438.2$, $p < .001$, and outline drawings, $\chi^2 = 164.58$, $p < .001$, with lower accuracy in prototypical trials than intersection trials, both of which were lower than middle-part trials ($ps < .001$). Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), showed a significant increase in accuracy between younger and older children in silhouettes, $Z = -6.09$, $p < .001$, and outline drawings, $Z = -5.36$, $p < .001$. As depicted in Figure 5, Kruskal-Wallis tests were conducted to assess the group effect (CP, TDca, TDnv) for the different difficulty levels and age-split groups. In silhouette drawings, CP children showed lower accuracy than TDca children in the young group, and TDca and TDnv children in the old group in the three degradation types, respectively for the prototypical trials, $H(2,129) = 6.79$, $p = .03$, and $H(2,129) = 34.92$, $p < .001$, intersection trials, $H(2,129) = 7.10$, $p = .03$, and $H(2,129) = 35.93$, $p < .001$, and middle-part trials, $H(2,129) = 5.99$, $p = .05$, and $H(2,129) = 32.22$, $p < .001$. In outline drawings, in the young group, children with CP showed comparable accuracy as TDca and TDnv children in prototypical trials, $H(2,129) = 3.09$, $p = .21$, and middle-part trials, $H(2,129) = 5.38$, $p = .07$, but lower accuracy than TDca and TDnv children in intersection trials, $H(2,129) = 10.26$, $p < .001$. In the old group, they showed lower accuracy than TDca children in prototypical trials, $H(2,129) = 7.97$, $p < .002$, and middle-part trials, $H(2,129) = 15.08$, $p < .001$, but comparable accuracy as TDca and TDnv children in intersection trials, $H(2,129) = 3.47$, $p = .18$.

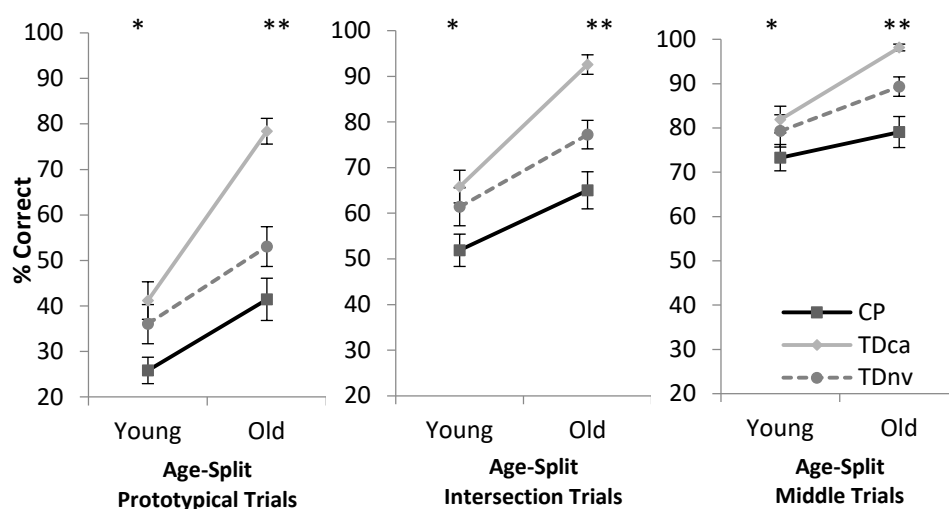
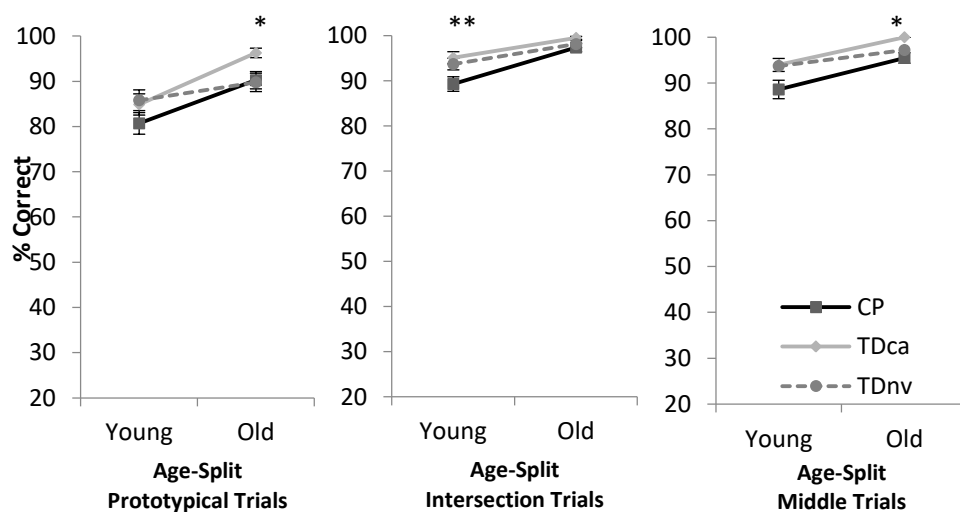
Silhouette drawings**Outline drawings**

Figure 5. Correct response percentages in silhouette and outline drawings of the incomplete figures subtest by age-split groups and type of image degradation. Standard errors are represented in the figure by error bars attached to each point.

* represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP and TDca children.

** represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP, and TDca and TDnv children.

Hierarchical Figures

Accuracy. Pairwise Wilcoxon tests conducted on the percentages of correct responses showed comparable accuracy in local and global analyses, $Z=1.82$, $p = .07$. Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old) showed a significant increase in accuracy between young and old children in both local, $Z= -3.42$, $p < .001$, and global trials, $Z= -4.61$, $p < .001$. As depicted in Figure 6, Kruskal-Wallis tests were conducted to assess the group effect (CP, TDca, TDnv) for the different difficulty levels and age-split groups. In local trials, CP children showed lower accuracy than TDca children in both the young group, $H(2,129)= 6.14$, $p = .05$, and old group, $H(2,129)= 10.28$, $p = .005$. In global trials, they showed comparable accuracy as TDca and TDnv children in the young group, $H(2,129)= 4.73$, $p = .09$, but lower accuracy than TDca children in the old group, $H(2,129)= 10.96$, $p = .004$.

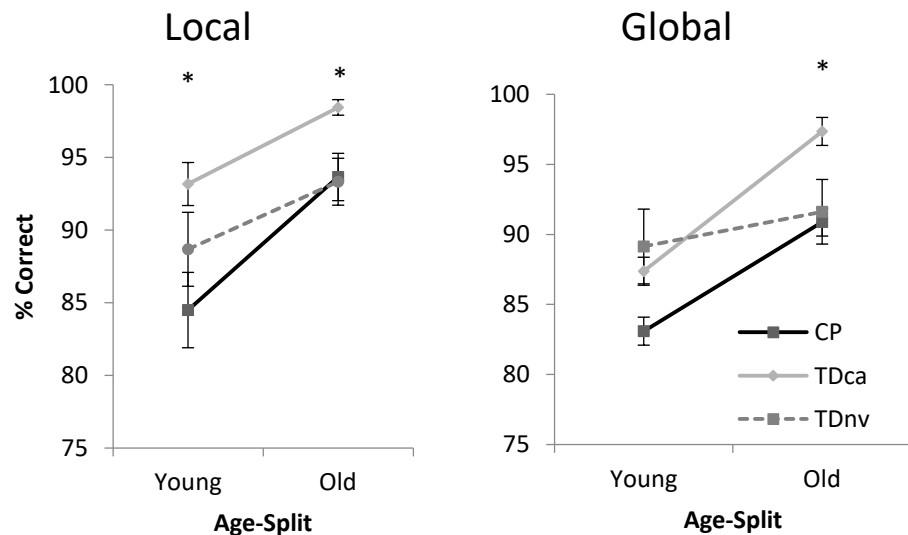


Figure 6. Correct response percentages in the hierarchical figures subtest by age-split groups and type of process. Standard errors are represented in the figure by error bars attached to each point.

* represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP and TDca children.

** represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between children with CP, and TDca and TDnv children.

RTs. Pairwise Wilcoxon tests conducted on median RTs showed comparable RTs in local and global analyses, $Z=1.82$, $p=.07$. Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), showed a significant decrease in RTs between young and old children in both the local, $Z= 5.24$, $p < .001$, and global trials, $Z= 5.57$, $p < .001$. Kruskal-Wallis tests were conducted to assess the group effect (CP, TDca, TDnv) for the different difficulty levels and age-split groups. In the local task, children with CP showed slower RTs than TDca children in the young, $H(2,112)= 9.01$, $p = .01$, and old groups, $H(2,123)= 7.29$, $p = .03$. In the global task, they showed comparable RTs as TDca and TDnv children in the young, $H(2,106)= 5.39$, $p = .07$, and old groups, $H(2,117)= 3.69$, $p = .17$.

Developmental Analysis

In this part, we compare the developmental trajectories of children with CP and TDca children to determine how the probability of success in each task is modulated by age and group (CP vs TDca). In this respect, logistic regression analyses (with a significance level of 5%) were conducted on the probabilities of success in each subtest in order to test the effect of group (CP, TDca, TDnv), age (5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14), and their possible interaction. These analyses, depicted in Figure 7, were used to determine whether integrative visual perceptual impairments reflect a simple developmental delay, a delay appearing with age, or a persistent deficit that increased or decreased over time.

Overlapping Figures

Logistic regression analysis revealed the significant effects of group ($p < .001$) and age ($p < .01$) as well as a significant interaction between age and group, $G^2 = 20.295$, $df = 4$, $p < .001$. The probability of success was higher in TDca children than in children with CP, but it did not improve in the same way with age in the two groups. In TDca children, the probability of success significantly increased between the ages of 5 and 10 years ($ps < .001$), and then stagnated until 14 years ($p = .89$). In CP children, the probability of success significantly increased between the ages of 7 and 14 years ($p = .05$), but stagnated between 9 and 12 years ($p = .81$). The group effect was significant from 7

years ($ps < .001$) but did not increase with age: the difference between CP and TDca children remained stable between 7 and 14 years ($ps > .35$), thus confirming the presence of a stable and persistent delay in children with CP. CP children aged 13-14 years showed similar probabilities of success as TD children aged 7-8 years ($p > .10$) and significantly lower probabilities of success than those aged 9-10 years ($p = .001$) and older ($ps < .001$).

Incomplete Figures

Logistic regression analysis of the **silhouette drawing** task revealed significant effects of group ($p < .001$) and age ($p < .01$) as well as a significant interaction between age and group, $G^2 = 110.24$, $df = 4$, $p < .001$. The probability of success was higher in TDca children than CP children, but it did not improve in the same way with age in the two groups. In TDca children, the probability of success significantly increased between 5 and 12 years ($ps < .005$), and then stagnated until 14 years ($p = .08$). In CP children, the probability of success significantly increased between 9 and 14 years ($p < .001$), but stagnated between 11 and 14 years ($p = .99$). The group effect increased during the course of development ($p < .001$): the difference between CP and TDca children was significant at 5-6 years ($p = .04$) and progressively increased until 13-14 years ($p < .001$). From 7-8 years, the gap was significantly greater than at 5-6 years ($p = .002$), thus confirming the presence of a delay increasing with age. Children with CP aged 13-14 years showed significantly lower probabilities of success than TD children aged 7-8 years ($p = .02$) and older ($ps < .001$).

Logistic regression analysis of the **outline drawing** task revealed significant effects of group ($p < .01$) and age ($p < .01$) as well as a significant interaction between age and group, $G^2 = 31.39$, $df = 4$, $p < .001$. The probability of success was higher in TDca children than CP children, but it did not improve in the same way with age in the two groups. In TDca children, the probability of success significantly increased between the ages of 5 and 10 years ($ps < .008$) and then stagnated until 14 years ($ps > .25$). In children with CP, the probability of success significantly increased between the ages of 5-6 and 7-8 years ($p < .001$), stagnated between 7-8 and 11-12 years ($ps > .35$), and then increased between 11-12 and 13-14 years ($p = .009$). The group effect did not increase during the course of development ($p = .47$): the difference between CP and

TDca children was significant at 5-6 years ($p = .004$), 9-10 years ($p < .001$), and 11-12 years ($p < .001$), but given the significant increase in the probability of success between 11 and 14 years, the difference between groups was no longer significant at 13-14 years ($p = .07$). Children with CP aged 13-14 years showed similar probabilities of success as TD children of the same age ($p = .07$) and younger ($ps > .13$), except those aged 5-6 years, with CP children obtaining higher probabilities of success ($p < .001$).

Hierarchical Figures

Logistic regression analysis revealed significant effects of group ($p < .01$) and age ($p < .01$) as well as a significant interaction between age and group, $G^2 = 31.34$, $df = 4$, $p < .001$. The probability of success was higher in TDca children than CP children, but it did not improve in the same way with age in the two groups. In TDca children, the probability of success significantly increased between 7-8 and 9-10 years ($p < .001$) and then stagnated until 14 years ($ps > .05$). In children with CP, the probability of success significantly increased between 5-6 and 7-8 years ($p < .001$), stagnated between 7-8 and 9-10 years ($p = .21$), then increased between 9-10 and 11-12 years ($p = .02$) and once again stagnated between 11-12 and 13-14 years ($p = .14$). The group effect decreased during the course of development ($p = .01$): the difference between children with CP and TDca children was higher at 5-6 years compared with older age groups, even if these differences were significant in all age groups ($ps < .001$), except for 7-8 years ($p = .16$), thus confirming the presence of a delay decreasing with age. Children with CP aged 13-14 years showed significantly lower probabilities of success than TD children aged 9-10 years and older ($ps < .001$).

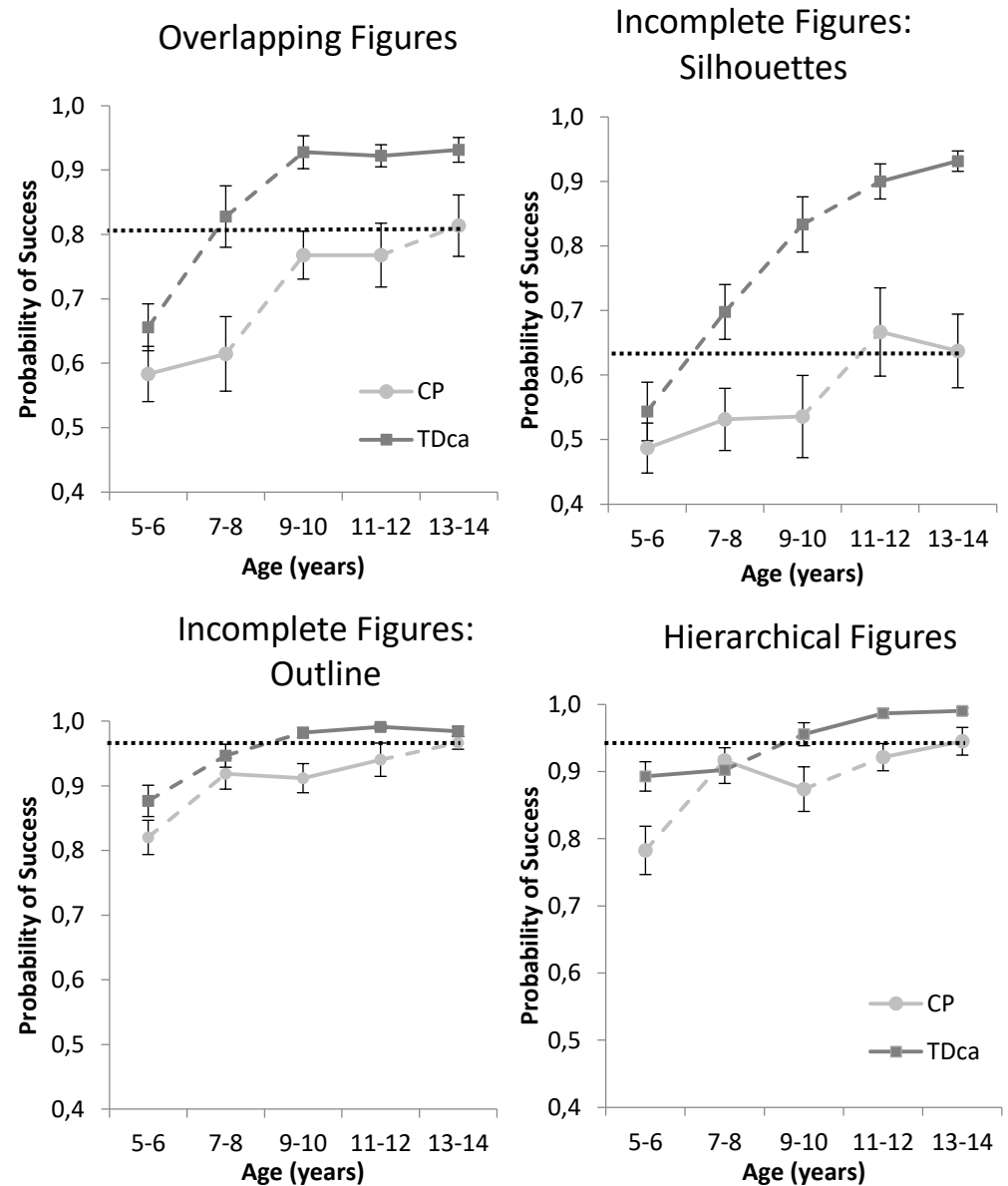


Figure 7. Probabilities of success in the overlapping figures, silhouette drawings of incomplete figures, outline drawings of incomplete figures, and hierarchical figures subtests by age. Standard errors are represented in the figure by error bars attached to each point.

..... Represents the level of probability of success reached by the age of 13-14 years in children with CP.

--- Represents the interval of age in which performance increases significantly.

Discussion

This second experiment aimed to determine whether children with CP present a selective or global impairment of integrative visual perceptual processing compared to TD children matched on either chronological age or nonverbal reasoning abilities. The second aim was to examine the developmental trajectory of their integrative visual perceptual impairment to determine whether their difficulties reflect a developmental delay or persistent deficit. Lastly, this experiment examined the impact of difficulty levels on the performances of CP children in the three integrative visual perceptual processes.

The first aim of this experiment was to assess the selectivity and specificity of integrative visual perceptual impairments. With regard to selectivity, the pattern of results across tasks revealed that CP children performed worse than TDca children regardless of the task and difficulty level with a few exceptions observed in the young group (completely overlapped two-drawing trials, incomplete outline drawings degraded on the prototypical and middle parts, and global hierarchical trials) in which children with CP showed similar performances as TDca children. This indicates that the integrative visual perceptual processes are globally impaired in young children with CP even if certain difficulty levels are not impaired, as well as in older children with CP for whom impairments are reported in all tasks.

The assessment of impairment specificity revealed that CP and TDnv children performed similarly with a few exceptions. In the young group, children with CP performed worse in the incomplete figures subtest only for outline drawings degraded on the intersection parts. In the old group, they performed worse in the overlapping figures subtest for completely overlapped four-drawing trials and in the incomplete figures subtest for all silhouette drawing trials. Moreover, no significant differences were observed between CP and TDnv children in the hierarchical figures subtest with regard to accuracy and RTs. Hence, young children with CP did not show specific impairments in integrative visual perceptual processing, while older children with CP showed specific impairments in the processing of figure-ground discrimination and visual closure, but not local-global processing.

First, considering figure-ground discrimination, previous studies (Barca et al., 2010; Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987) showed deficits in children with CP assessed using various matching tasks with drawings of everyday objects and geometrical shapes, but none take into account the effects of overlapping degree, number of drawings, and age on performances. In our study, both the overlapping degree and number of overlapped drawings had a significant impact on children's performances. In fact, CP children showed significant impairments in completely overlapped drawings, but no such deficit was noted in partially overlapped or contiguous drawings. Concerning the number of overlapped drawings, the higher the number, the greater the deficit compared to TD children. These impairments were more marked in older children with CP.

Second, regarding visual closure, previous studies (Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; van den Hout et al., 2004) showed perceptual grouping impairments in children with CP but did not take into account the effects of drawing type, degradation type, and age on performances. Nevertheless, our study revealed that children with CP showed greater impairments in silhouette drawings than outline drawings. Moreover, trials with degradations on the prototypical parts were the most impaired compared to those degraded on the intersections or middle parts. In figure-ground discrimination, for example, these impairments were more pronounced in older than younger children with CP. Yet more research is necessary in order to determine whether silhouette drawings are less effective than outline drawings in all age groups for both CP and TD children. In fact, in brain-injured adults patients with integrative agnosia, silhouettes are better recognized than outline drawings, because the former have only global information, while the latter simultaneously have global and local information, which can be confusing for agnosic patients (Humphreys & Riddoch, 1987a; Riddoch et al., 2008).

Third, considering local-global processing, previous studies on TD children showed the influence of item type (geometric shapes or objects, references), the number of local parts in the global shape (Kramer et al., 1996; Poirel et al., 2008), the size of local parts (Kramer et al., 1996), and the type of response (free or forced local-global choice) on children's responses. These studies also highlighted the presence of a global bias as well as the effect of children's ages. Yet no study to our knowledge has analyzed these criteria in children with CP. Our study did not reveal any significant difference between global and local performances, whether in younger or older CP and TD children.

Moreover, for this process, children with CP only showed impairments in local and global trials in comparison with TDca children, but not with TDnv children.

The second aim of this experiment was to assess the persistence of deficits exhibited by CP children. Developmental analyses revealed the presence of deficits in all age groups, not only in the youngest group, for the integrative visual perceptual processing. The comparison of developmental curves revealed lower probabilities of success for CP children compared with TDca children in the three subtests.

These comparisons also revealed different independent developmental curves in CP and TDca children. In the overlapping figures subtest (completely overlapped trials), TDca children showed a significant improvement of their probabilities of success between 5 and 10 years, but then stagnated until 14 years. CP children, however, showed a significant improvement of their probabilities of success between 7 and 14 years, with a period of stagnation between 9 and 12 years. Between-group differences were significant from 7 years but did not increase with age. These results confirm the presence of a stable and persistent developmental delay for figure-ground discrimination processing. In the incomplete figures subtest, silhouettes and outline drawings showed distinct developmental curves. In silhouette drawings, the probabilities of success of TDca children improved between 5 and 12 years, and then stagnated until 14 years. Children with CP showed a significant improvement of these probabilities between 9 and 11 years, with a period of stagnation between 11 and 14 years. Between-group differences were significant from 5 years and increased significantly with age. By contrast, in outline drawings, the probabilities of success of TDca children improved until 10 years, while those of CP children improved only between 5 and 8 years, and between 11 and 14 years. Between-group differences were significant only at 5-6 and 9-12 years and did not progress with age. All these results confirm the presence of a delay increasing with age for visual closure processing based on silhouette drawings, and the presence of age-specific deficits for visual closure processing based on outline drawings. In the hierarchical figures subtest, TDca children showed a significant improvement of probabilities of success between 5 and 8 years, which then stagnated until 14 years, while those of CP children increased between 5 and 8 years, and then 9 and 12 years. Between-group differences were significant from 5 years, but diminished with age. These results confirm the presence of a delay decreasing with age for local-global processing.

Except in the outline drawings of the incomplete figures subtest, these results confirm that children with CP present persistent deficits across ages that do not correspond to a simple developmental delay for figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processing. This means that CP children do not reach the performance level.

The third aim of this experiment was to determine the impact of difficulty levels on the performances of children with CP. A significant effect of the difficulty level was shown, except in the hierarchical figures subtest. In the overlapping figures subtest, partially overlapped and contiguous trials showed a ceiling effect in TDca and TDnv children, and in CP children, respectively. Given that these two parts of the subtest are not discriminant, they were not considered in further analyses. Conversely, the completely overlapped trials allowed a good discrimination between TDca, TDnv, and CP children thanks to the increasing number of drawings in the items. In the incomplete figures subtest, no ceiling effect was observed, meaning that the two parts (silhouette drawings and outline drawings), each separated into three difficulty levels (prototypical, intersection, middle), allowed a good discrimination between performances for these levels as well as for the three groups of children.

To sum up, this second experiment highlights that the impairments of integrative visual perceptual processing are influenced by age and subtest difficulty levels. Impairments are global and specific only in older CP children in figure-ground discrimination and visual closure, but not in local-global processing, while they are selective and nonspecific in younger CP children. Nevertheless, these impairments persist in time and do not represent a simple developmental delay, meaning that CP children do not reach TDca children's levels of performance in the three assessed integrative processes.

GENERAL DISCUSSION

The present study addresses two main issues concerning the development of integrative visual perceptual processing by assessing figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processes in TD and CP children using the overlapping figures, incomplete figures, and hierarchical figures subtests of the BEVPS.

These three subtests allow a detailed assessment of the various developmental facets of children with typical and atypical development of integrative visual perceptual processes. Each difficulty level evaluates different sensitive periods of development to capture the entire developmental trajectory, except for the partially overlapped and contiguous drawing trials of the overlapping figures subtest for which performances reached the ceiling level. The comparison of performances between the different groups of children showed particular profiles according to the age groups and difficulty levels of the tasks.

This study highlighted the importance of specifically assessing these various levels of difficulty at different ages, because children present specific profiles of impairments. Thus, impaired and preserved processes have to be dissociated in order to best adapt school learning and individual rehabilitation programs.

Considering the different difficulty levels included in the three subtests, future research could increase the difficulty of the overlapping figures subtest by including trials with a greater number of completely overlapped drawings (e.g., five to seven). Furthermore, a free choice task of hierarchical figures in which children have to choose the figure that best matches the model based on local or global characteristics could be proposed in order to examine local-global processing bias. Then, considering the impairments presented by CP children in the naming part of the overlapping figures and incomplete figures subtests, it could be interesting to also propose a matching task to assess their real level of impairment.

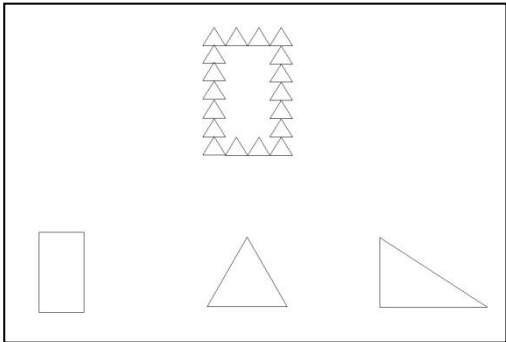
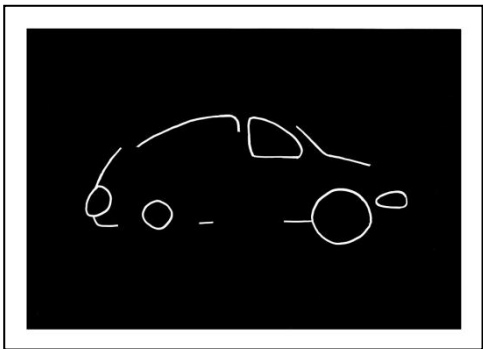
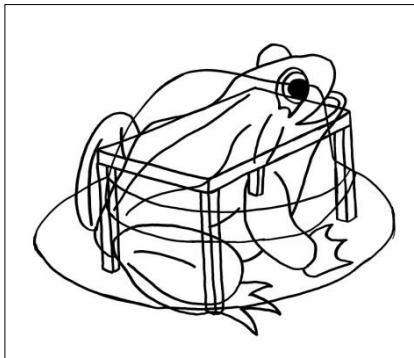
Lastly, these subtests could also be used in children with other neurodevelopmental pathologies such as Williams syndrome, Velocardiofacial syndrome, and epileptic encephalopathy to define more precisely their visual perceptual processing and adapt rehabilitation programs.

One limitation of this study is that it restricts the sample to children with spastic CP, with the aim to reduce the heterogeneity inherent to this pathology. Future studies should be extended to children with other forms of CP. They should also increase the sample size to determine which factors (i.e., prematurity, birth weight, location of motor disorder, brain lesion, type of neurovisual disorder) influence or degrade visual perceptual processing. Further studies could also include adolescents and adults with CP to determine whether integrative visual perceptual processing improves at a later stage than in typical development. Finally, view-independent object recognition processing will be considered in future research on TD and CP children to complete the definition of typical and atypical development of visual object recognition.

APPENDICES

Appendix A.

Examples of the three BEVPS subtests.



Appendix B.

Descriptive statistics with mean percentages (M) of correct responses and standard deviations (SD) of the overlapping figures, incomplete figures, and hierarchical figures subtests for each difficulty level according to the seven age groups.

		4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		Adults		
Tests	Difficulty	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	
Overlapping figures	complete	2D	60.71	27.24	75	23.25	88.75	13.81	97.50	7.6	98.68	5.66	98.84	7.62	100	0
		3D	62.5	25.48	71.71	19.43	86.88	18.77	96.25	9.04	95.39	9.82	97.09	9.77	97.37	7.88
		4D	25	19.61	48.68	25.96	71.88	28.97	81.88	20.4	86.18	17.14	87.21	14.81	92.11	11.94
	partial	2D	92.86	15.28	95.39	11.41	99.38	3.95	98.75	5.52	100	0	100	0	100	0
		3D	92.86	11.72	98.03	6.83	100	0	99.38	3.95	99.34	4.06	100	0	100	0
		4D	85.71	18.9	94.74	11.85	98.75	7.91	98.13	8.75	100	0	100	0	100	0
	touching	2D	96.43	13.36	100	0	99.38	3.95	100	0	100	0	100	0	100	0
		3D	94.64	10.65	99.34	4.06	99.38	3.95	100	0	99.34	4.06	100	0	100	0
		4D	98.21	6.68	100	0	99.38	3.95	100	0	98.68	5.66	99.42	3.81	100	0
Incomplete figures: Silhouettes	Prototypical	15	15.06	30.51	26.15	48.21	27.04	60.50	23.53	73.78	20.19	82.62	14.99	92.11	9.18	
	Intersection	35	17.43	56.41	28.24	73.33	18.68	83.25	16.85	93.51	9.49	94.29	9.91	97.37	5.62	
	Middle	56.43	20.61	72.05	24.62	88.97	13.53	94	9.55	98.65	3.47	99.05	2.97	100	0	

Incomplete figures: Outline	Prototypical	62.86	12.67	81.79	15.54	91.03	10.95	92	11.59	96.22	6.39	96.67	6.87	98.42	3.75
	Intersection	77.86	13.11	92.31	10.63	97.95	4.69	99.25	2.67	99.73	1.64	99.52	2.16	100	0
	Middle	85.71	13.42	89.49	12.13	96.92	5.69	99	3.04	100	0	100	0	100	0
Hierarchical figures: Local Global	RCO	75.24	20.66	87.93	19.99	91	15.95	96.67	6.58	95.79	14.33	97.67	7.54	99.67	1.49
	RTs	6292	4642	3428	1175	2491	898	2020	536	1622	482	1509	365	1327	345
	RCO	84.29	19.15	79.28	28.92	83.83	28.6	88.5	25.8	95.44	14.63	96.28	15.55	98.67	3.49
	RTs	3829	1405	3741	1405	2702	1366	2142	841	1680	486	1456	324	1231	244

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses). 2D means two-drawing trials, 3D means three-drawing trials and 4D means four-drawings.

Appendix C.

Main characteristics of the children with cerebral palsy.

Characteristics		N			N
Age & Gender	Young (5, 6, 7, 8, 9)	43 (23-20)	Gestational age	≥37 weeks	37
	(male/female)	43 (19-24)		33-36 weeks	21
Motor disorder	Diplegia	17	Birth weight	28-32 weeks	21
	Right hemiplegia	27		<28 weeks	7
	Left hemiplegia	25		+2500g	40
	Quadriplegia	17		1500-2500g	24
GMFCS	Level I	54	Epilepsy	1000-1500g	17
	Level II	16		750-1000g	5
	Level III	9		Yes	17
	Level IV	7		No	69
Cerebral lesion	Right PVL	6	Ophthalmic disorders	Myopia	9
	Right PVL + subcortical lesions	4		Hypermetropia	15
	Left PVL	8		Strabismus	30
	Left PVL + subcortical lesions	2		Astigmatism	20
	Left PVL + cortico-subcortical lesions	2		Amblyopia	3
	Bilateral PVL	24		Nystagmus	4
	Subcortical lesions	7		Visual fields	2
	Cortico-subcortical lesions	15		No impairment	32
	No lesion	4	Schooling	Mainstream	63
	No information	14		Special education	23

Note. PVL = Periventricular Leukomalacia, GMFCS = Global Motor Functional Classification Scale; Level I = walk without restrictions, Level II = walk with some restrictions, Level III = walk with hand-held level mobility device, Level IV = autonomous powered mobility.

Appendix D.

Descriptive statistics with mean percentages (M) of correct responses and standard deviations (SD) for each difficulty level of the overlapping figures subtest according to the age-split and three children groups.

		Complete 2D		Complete 3D		Complete 4D		Partial 2D		Partial 3D		Partial 4D		Touching 2D		Touching 3D		Touching 4D	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	74.97	24.95	67.42	24.69	39.55	26.26	92.37	14.94	93.53	17.29	92.36	16.81	98.74	5.31	100	0	100	0
	old	84.24	21.79	84.83	23.19	61.02	28.98	91.79	13	94.68	16.84	90.62	20.38	95.84	17.16	97.00	13.57	97.58	11.95
TDca	young	83.09	21.59	79.61	19.82	62.77	29.52	98.16	6.42	99.32	3.8	98.16	6.42	100	0	98.74	5.31	100	0
	old	98.16	8.42	94.69	11.61	84.25	17.23	99.32	3.8	99.32	3.8	98.16	8.42	100	0	99.32	3.8	99.32	3.8
TDnv	young	79.61	21.95	77.29	20.24	52.32	31.68	97	8.08	98.16	6.42	95.84	12.08	99.32	3.8	98.74	5.31	99.32	3.8
	old	90.05	14.53	90.63	15.41	75.54	26.39	100	0	100	0	98.74	5.31	100	0	99.32	3.80	100	0

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix E.

Descriptive statistics with mean percentages (M) of correct responses and standard deviations (SD) for each difficulty level of the incomplete figures subtest according to the age-split and three children groups.

		Silhouettes						Outline					
		Prototypical		Intersection		Middle		Prototypical		Intersection		Middle	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	25.81	19.05	51.86	23.22	73.26	19.48	80.7	15.64	89.3	10.55	88.6	13.2
	old	41.43	30.09	65	26.34	79.05	22.72	90.24	12.39	97.38	6.27	95.48	7.39
TDca	young	41.16	27.01	65.81	23.53	81.86	19.79	84.88	15.33	95.12	8.83	93.95	9.29
	old	78.37	18.51	92.56	13.99	98.14	5	96.28	6.91	99.53	2.13	100	0
TDnv	young	36.05	27.79	61.4	27.31	79.3	23.84	85.81	15	93.72	8.46	93.72	8.17
	old	53.02	28.66	77.21	20.51	89.3	14.37	89.77	13.36	98.14	5.46	97.21	5.49

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix F.

Descriptive statistics with mean percentages of correct responses (RCO), median reaction times (RTs), and standard deviations for each difficulty level of the hierarchical figures subtest according to the seven age groups.

		Local		RCO		RTs		Global		RCO		RTs	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	84.5	17.01	2146	3478	83.1	18.65	1858	2743				
	old	93.66	10.43	1015	1207	90.89	16.38	667	748				
TDca	young	93.17	9.6	1183	1001	87.38	13.96	1341	985				
	old	98.45	3.51	682	474	97.36	7.99	637	490				
TDnv	young	88.68	16.68	1586	2682	89.15	17.52	1350	1720				
	old	93.33	10.59	907	565	91.63	15.12	843	618				

Note. Bold numbers represent performances the reaching ceiling level (>95% of correct responses).

VIEW-INDEPENDENT OBJECT REPRESENTATION AND ACCESS TO STORED STRUCTURAL KNOWLEDGE IN CHILDREN WITH TYPICAL DEVELOPMENT AND CEREBRAL PALSY

Schmetz E, Magis D, Detraux JJ, Barisnikov K, Rousselle L

In preparation

Abstract

The present study aims to assess late visual perceptual processing in two populations of children, one with typical development (TD) and the other with cerebral palsy (CP). The development of these transformative processes that lead to view-independent object representation and access to stored structural knowledge was examined in 215 TD children aged between 4 and 14 years and 20 young adults (Experiment 1), as well as in 86 CP children aged between 5 and 14 years (Experiment 2) using the object constancy, object decision, and object completion subtests of the battery for the evaluation of visual perceptual and spatial processing (BEVPS). Experiment 1 showed that in TD children, the transformative processes follow different developmental trajectories. In the object constancy task, adult maturity was reached between 5 and 10 years depending on the different viewpoints. In the object decision task, animate trials did not show any significant development between 5 years and adulthood, while inanimate trials did. In non-real trials, adult maturity was reached by the age of 7-8 years, and in real trials only by the age of 13-14 years. In the object completion task, adult maturity was attained by the age of 9-10 years in both animate and inanimate trials. Experiment 2 indicated that the performances of children with CP were significantly influenced by age and difficulty levels. Impairments presented by CP children can be considered to be global and specific given that certain difficulty levels of the three tasks were impaired compared to TD children matched on chronological age and nonverbal reasoning abilities. These impairments are persistent in time, meaning that they are present in all age groups, with the performance level of the oldest CP children corresponding to that of the youngest TD children.

Keywords: child, development, cerebral palsy, visual perceptual processes, length, surface, orientation, position

INTRODUCTION

Visual object recognition, being essential in everyday life, was initially described and modeled 30 years ago by Humphreys and Riddoch (1987b). Their hierarchical model based on brain-damaged adults divided visual object recognition into a succession of different processing levels. In 2006, Humphreys and Riddoch made the distinction between features processing and object processing. Features processing includes the coding of different object dimensions such as shape, depth, and movement, and the subsequent combination of these features, while object processing includes three main categories of processes that lead to visual object recognition. The first includes three integrative processes for the creation of view-dependent object representation, namely visual closure, figure-ground discrimination, and local-global processing. The second involves transformative processes leading to view-independent object representation and providing access to stored structural knowledge in the long-term memory. Finally, the third includes semantic processes that give access to stored semantic knowledge in the long-term memory as well as object naming.

However, this research based on brain-damaged adults does not show how these visual perceptual processes develop in a typical way. Such a developmental approach is nevertheless necessary in order to determine how gradual changes occur from early childhood to adulthood. Typical developmental trajectories could be used as a reference point to assess the development of each visual perceptual process in neurodevelopmental pathologies and thus detect any deviance or delay with regard to specific tasks (Thomas et al., 2009).

Recent investigations (Schmetz et al., studies 2 and 3 in this thesis) on features processing and integrative object processing aim to compare their development in typically developing (TD) children and children with cerebral palsy (CP) using the same tasks, with the results showing that these visual perceptual processes follow distinct developmental trajectories in TD children from the age of 5 years to adulthood. These studies reveal global and specific deficits in CP children compared to TD children in the vast majority of tasks assessing the features processing of length, surface, orientation, and position, as well as the object processing of figure-ground discrimination, visual closure, and local-global processing. Global deficits mean that CP children showed significant impairments in most processes at various difficulty levels, while specific

deficits indicate that CP children showed significant impairments compared to TD children matched on nonverbal reasoning abilities. Moreover, these studies revealed that the deficits were persistent in time. In fact, from 5 to 14 years, children with CP showed significant impairments compared to TD children. For some levels of features processing (i.e., length, surface, orientation), 13- to 14-year-old CP children barely reached the performance level of 5- to 6-year-old TD children. Comparing CP and TD children matched on chronological age and nonverbal reasoning abilities, Stiers et al. (2002) showed the specificity of visual perceptual impairments of the former using the L94 battery. They also showed a great discrepancy between the number of impairments in children with CP when compared on chronological age (high level) or nonverbal reasoning abilities (low level), as confirmed in the studies of Schmetz et al. (studies 2 and 3 in this thesis). By contrast, Fazzi et al. (2004, 2009) showed that CP children (mainly premature children with spastic diplegia) present impairments at different processing levels, thus confirming the global nature of deficits.

This paper will focus on the transformative processes leading to view-independent representations of objects, which are usually assessed using object constancy tasks in which several objects or geometric shapes presented from different viewpoints have to be matched (Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007; Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; Stiers et al., 2001, 2002). As part of the transformative processes, access to stored structural knowledge implies matching the percept to a structural representation defined by the object's physical characteristics. It is usually assessed using object decision tasks in which participants must decide whether or not the presented objects and non-objects exist (Bova et al., 2007; Cooper, Schacter, Ballesteros, & Moore, 1992; Fazzi et al., 2009; Hovius, Kellenbach, Graham, Hodges, & Patterson, 2003; Humphreys & Riddoch, 1987b). This study will also focus on CP, which can be defined as a group of permanent disorders of the development of movement and posture that are attributed to non-progressive lesions in the developing brain. These motor disorders are accompanied by cognitive, intellectual, perceptual, and/or communicative disorders in most cases (Rosenbaum et al., 2007).

Little is known about how transformative processes develop in TD and CP children. Most studies investigating these processes in TD children aim to examine the nature of visual perceptual deficits in neuro-developmental pathologies with no interest given to specifying the typical developmental trajectories (Fazzi et al., 2007, 2009; Gillet et al.,

2009; Koeda et al., 1997; Menken et al., 1987; Stiers et al., 2002; Swain et al., 2009). Developmental studies using different tasks and methods showed a significant increase in performances in TD children between 3 and 11 years (Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007; Dekker, Mareschal, Sereno, & Johnson, 2011; Stiers et al., 2001). Stiers et al. (2001) used the “unconventional view” task of the L94 (Stiers et al., 1999), a naming task of everyday objects presented from different viewpoints such as a foreshortened view of the principal axis, a minimal feature view, and a prototypical view. Bezrukikh and Terebova (2009) used an adaptation of the form constancy task of the DTVP II (Hammil et al., 1993), a matching task of geometrical shapes that are presented at different orientations or included in other shapes, while Bova et al. (2007) and Dekker et al. (2011) used the unusual view task (Bova et al., 2007), a naming task based on photographs of everyday objects.

No research to date has focused on the development of these processes in CP, although a few studies have compared CP and TD children (Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; Stiers et al., 2002). Using different matching tasks with geometrical shapes (DTVP II: Hammil et al., 1993, TVPS: Martin 2006) or everyday objects (unconventional view of the L94: Stiers et al., 1999; unusual perspective task: Bova et al., 2007), these studies showed that children with CP had significant impairments in transformative processes. All the studies on TD and CP children used a global score, but none analyzed the variables that can influence view-independent object recognition such as different unusual perspectives and the distinction made by Humphreys and Riddoch (1987b) between the minimal features view (object with hidden main features but visible principal axis) and the foreshortened view (object with visible main features but elongated principal axis). Finally, only the studies of Bova et al. (2007) and Fazzi et al. (2009) in TD and CP children, respectively, included a task assessing the access to structural knowledge using drawings of animate and inanimate objects (imaginary figures task, BORB 1993). While TD children showed a significant increase in performances between 6 and 11 years (Bova et al., 2007), CP children with spastic diplegia showed significant impairments (Fazzi et al., 2009). To our knowledge, no other study has shown an interest in the access to structural knowledge in other forms of CP or from another developmental perspective.

Despite the presence of specific impairments in brain-damaged adults (Caramazza & Shelton, 1998; Humphreys & Riddoch, 2006) assessed according to the type of unusual presentation (i.e., foreshortened view vs minimal features view) or semantic categories of objects (i.e., animate vs inanimate, a specific superordinate level such as food, clothes, and animals), previous studies have failed to consider the influence of these variables on children's performance. By the same token, the existence of a color advantage in object recognition was detected in adult populations (Bramão, Reis, Petersson, & Faísca, 2011; Mapelli & Behrmann, 1997; Tanaka & Presnell, 1999), but not in children. This study will therefore analyze the effect of viewpoint and color in the object constancy task to evaluate view-independent object recognition. It will also investigate the effect of semantic categories (animate vs inanimate) in the object decision and object completion tasks to assess the access to stored structural knowledge.

Accordingly, the present study addresses two main issues concerning the development of transformative processes in two separate experiments. Experiment 1 examines the typical development of the different transformative processes leading to view-independent object recognition and access to stored structural knowledge from childhood to adulthood. Experiment 2 then investigates these processes in a group of 5- to 14-year-old CP children in comparison with a group of TD children matched on chronological age (TDca) or nonverbal reasoning abilities (TDnv).

In both experiments, these processes were examined using the object constancy, object decision, and object completion subtests of the battery for the evaluation of visual perceptual and spatial processing (BEVPS; Schmetz et al., 2017). In each task, the level of difficulty was manipulated to avoid floor and ceiling effects. Accuracy was analyzed for each difficulty level of the three subtests, while reaction times (RTs) were analyzed for each difficulty level of the object constancy and object completion subtests.

EXPERIMENT 1

In Experiment 1 that assesses the complete developmental trajectories, we first aimed to determine when transformative processes reached adult maturity in TD children. Second, we aimed to establish whether these processes follow similar or independent developmental trajectories.

Methods

Participants

A total of 215 TD children aged between 4 and 14 years and 20 adults aged between 20 and 25 years took part in the experiment. They were recruited in the Walloon Region (Belgium) through advertisements. All participants were native French speakers. They were predominantly Caucasian with middle to high socioeconomic status. Children were educated in primary school and the first two years of secondary school. Among the adults, ten held a secondary education diploma, while the remaining ten had reached higher education. Participants were selected based on the following exclusion criteria: the presence of a neurodevelopmental disorder (including cerebral visual impairment) or medical pathology causing school absenteeism, grade repetition, learning disability, or uncorrected eye disorder. All developmental and medical data were collected using a questionnaire completed by the children's parents or adults. This experimental protocol was set up in compliance of the Declaration of Helsinki and approved by the ethical committee of the Faculty of Psychology (University of Liège). The participants were split into seven age groups defined in Table 1.

Table 1.

Distribution of typically developing children and adults.

Ages	Total (n female-n male)	Mean ages [years;months]
4 years	15 (7-8)	4 years 6 months [4;1 – 4;11]
5-6 years	39 (20-19)	5 years 11 months [5 – 6;11]
7-8 years	40 (20-20)	7 years 11 months [7 – 8;11]
9-10 years	40 (20-20)	9 years 10 months [9 – 10;11]
11-12 years	38 (19-19)	12 years 0 months [11 – 12;11]
13-14 years	39 (20-19)	14 years 0 months [13 – 14;11]
Adults	20 (10-10)	21 years 4 months [20 – 25]

Materials

As extensively described in Schmetz et al. (2017), subtests were administered using a laptop with a 15.6-inch screen. The presentation of each item was preceded by a fixation point at the center of the screen for 1200 ms. Responses were recorded with the software Superlab © 4.5. To respond, the children had to press one of three colored switches measuring 6 cm in diameter (yellow left, blue middle, and red right) fixed on a wooden support in the front of the laptop on the table.

Tasks and Stimuli

Three subtests were used to specifically assess the processing of object recognition from unusual perspectives. The subtests were taken from the BEVPS designed to assess the different levels of perceptual and visual-spatial processing in TD children as well as in children with neurodevelopmental pathologies associated with restricted response abilities (Schmetz et al., 2017).

The three subtests were all matching tasks inspired by the BORB battery (Humphreys & Riddoch, 1993). One point was given for each correct response. Response latencies were recorded in milliseconds.

Object Constancy

Object constancy is a matching task designed to assess the visual recognition of objects presented from an unconventional perspective. This subtest was divided into two distinct tasks: one with black outline drawings on a white background and the other one with colored drawings (Fig. 1a, 1b). The two tasks were administered in a counterbalanced order across participants. Children were asked to select one of three options that matched a target object presented from another perspective. The distractors consisted of objects presenting a similar global shape to the target. Correct answers represented the target object from nine possible perspectives, two on the vertical plane and seven on the horizontal plane (see Table 2).

Table 2.

Distribution of the different trials according to the selected plane and rotations in each task for the outline and colored drawings.

Category name	Plane	Rotations	Number of trials
Vertical turn	Vertical	Above–Below	6
Low front turn	Horizontal	45°–315°	6
Quarter turn	Horizontal	90°–270°	6
Low back turn	Horizontal	135°–225°	6
About turn	Horizontal	180°	3

Object Decision

Object decision is a task designed to evaluate the access to a structural description of the object based on known real-life characteristics. Children were presented with a series of black outline drawings of objects presented on a white background and asked to decide whether or not the presented object was real (Fig. 1c). A total of 32 items were presented in random order: 16 items were animate objects (e.g., owl, dog) and 16 were inanimate objects (e.g., trousers, chair). In each category, half of the items were non-real objects created by assembling half parts of real objects, while the other half were real objects presented from a prototypical perspective.

Object Completion

Object completion is a matching task that assesses the ability to access the structural description of an object based on its local parts. Children were presented with parts of an object and asked to choose the missing part of the target object from among three possibilities (Fig. 1d). The task included ten items of animate objects (e.g., owl, dog) and ten items of inanimate objects (e.g., trousers, chair) presented in random order, with a total of 20 items. The distractors consisted of parts of real objects presenting a similar global shape to the correct response.

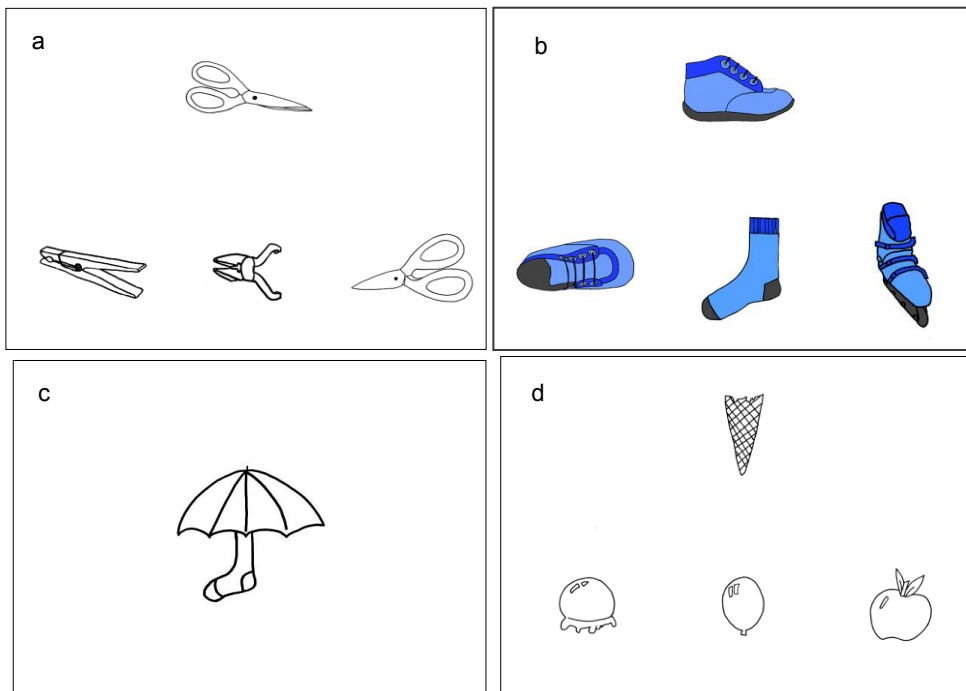


Figure 1. Examples of items belonging to the late processing stage: (a) outline drawings task of object constancy, (b) colored drawings task of object constancy, (c) object decision subtest, and (d) object completion subtest.

Control Task: Reaction Time Subtest

The RT subtest is a matching task used to measure visual-attentional abilities as well as the general processing speed required to provide a manual motor response using the switches and matching skills. These individual motor response latencies were used to control for inter-individual general processing speed differences across participants in the matching tasks. Children were presented with 24 target colored geometric shapes (circle, arrow, rectangle, and cross) and asked to select the identical stimuli from among three possibilities. The distractors were easily distinguishable from the targets, as they differed in shape, size, and color to minimize perceptual processing. As in the other matching tasks of the battery, stimuli were left in full view with no time limit. A score of 21 or less out of 24 was the exclusion criteria for this experiment. Failure to reach this target meant that participants did not proceed to the experimental tasks and were excluded from the study.

Procedure

Children were tested individually in a quiet room. The order of the tasks was counterbalanced across all age groups. However, the RT subtest initiates children's testing to allow them to become familiarized with the equipment. Each subtest starts with two practice trials that present the easiest items to ensure that children understand the instructions and requirements of the task. No feedback was provided during the test: children were autonomous in providing answers, but regularly encouraged to maintain their attention on the task.

Results

Participants with z-scores less than three standard deviations below the mean in one of the three subtests according to their age groups were considered to be outliers. Four children met this criterion in one or more tasks and were thus removed from all analyses. All computations were performed using the R software (R Core Team, 2016) and Statistica 13 software. Mean accuracy, median RTs, and standard deviations for each group and difficulty level are presented in Appendices A, B, and C. Despite the natural logarithm transformation, our data did not follow a normal distribution. Hence, we used non-parametric tests. Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were conducted per age class for both correct response percentages and median RTs for each difficulty level of the different subtests. When statistically significant differences were detected, multiple post-hoc comparisons were performed between the adult group and each age class using the Wilcoxon rank-sum test and multiple comparison adjustment using Benjamini and Hochberg's (1995) approach. Moreover, Friedman tests (with a significance level of 5%) were carried out per difficulty level for both correct response percentages and median RTs (based on correct response only). It should be noted that the median RTs of the hierarchical figures subtest are only based on correct responses and subjected to a transformation to control for global processing speed differences using the following formula: (RTs subtest – RTs control task).

Gender effect was computed in each task using Mann-Whitney tests (accuracy and RTs), but this effect was never significant (all $ps > .05$).

Object Constancy

Accuracy. The Friedman test conducted on the percentages of correct responses yielded a significant difference between drawing types, with lower accuracy in outline than colored drawings, $\chi^2 = 66.48$, $p < .001$, and a significant difference between the degree of rotation (vertical turn, low front turn, quarter turn, low back turn, about turn) in both outline, $\chi^2 = 209.6$, $p < .001$, and colored drawings, $\chi^2 = 66.47$, $p < .001$. Pairwise Wilcoxon comparisons indicated the lowest accuracy in vertical turn trials ($ps < .001$) in outline drawings, and in quarter turn trials ($ps < .001$) in colored drawings. These tests also showed lower accuracy in vertical turn and low back turn trials than about turn trials ($ps < .001$). Kruskal-Wallis tests, conducted separately for each level of difficulty, showed a significant increase in accuracy with age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14 years, and adults). As seen in Figure 2, in outline drawings, accuracy reached maturity by the age of 9-10 years in vertical turn, $H(6) = 29.10$, $p < .001$, quarter turn, $H(6) = 23.51$, $p < .001$, low back turn, $H(6) = 65.11$, $p < .001$, and about turn trials, $H(6) = 58.57$, $p < .001$. Nevertheless, accuracy was already developed by the age of 5-6 years in low front turn trials, $H(6) = 13.51$, $p = .03$. As depicted in Figure 2, in colored drawings, accuracy reached maturity by the age of 5-6 years in vertical turn, $H(6) = 46.47$, $p < .001$, and about turn trials, $H(6) = 54.54$, $p < .001$. This maturity was nevertheless reached by the age of 7-8 years in low front turn trials, $H(6) = 28.19$, $p < .001$. Lastly, accuracy was fully developed by the age of 9-10 years in quarter turn, $H(6) = 74.24$, $p < .001$, and low back turn trials, $H(6) = 60.27$, $p < .001$.

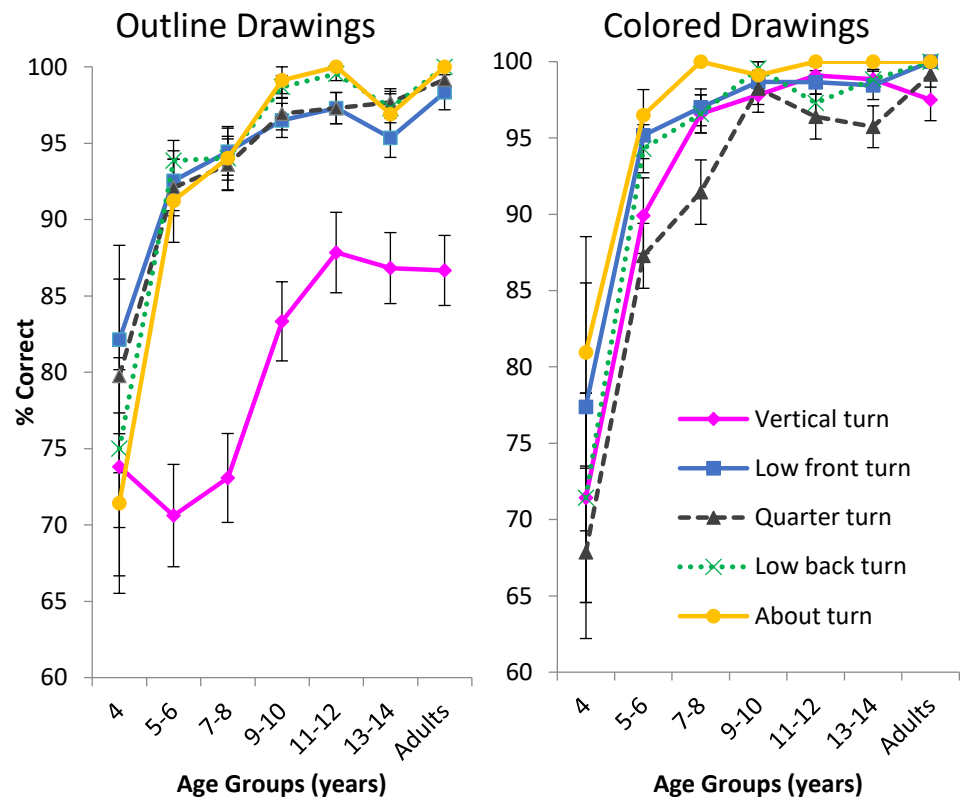


Figure 2. Correct response percentages in (a) outline drawings and (b) colored drawings of the object constancy subtest according to age and difficulty levels. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

RTs. Friedman tests conducted on median *RTs* did not show any significant difference in terms of the type of drawings (outline vs colored), with comparable *RTs* being observed in outline and colored drawing trials, $\chi^2 = 1.61$, $p = .20$. Nevertheless, significant differences were found for the degree of rotation (vertical turn, low front turn, quarter turn, low back turn, about turn), $\chi^2 = 129.7$, $p < .001$. Pairwise Wilcoxon comparisons indicated slower *RTs* in vertical turn trials compared to all horizontal plane rotations ($ps < .001$) in outline drawings, and slower *RTs* in quarter turn trials compared to other rotations ($ps < .001$) in colored drawings. These tests also showed faster *RTs* in about turn trials than vertical turn and low back turn trials ($ps < .001$). Kruskal-Wallis

tests conducted separately for each difficulty level did not show any significant decrease in RTs with age ($ps > .05$).

Object Decision

Accuracy. Pairwise Wilcoxon comparisons conducted on the percentages of correct responses showed lower accuracy in animate trials compared to inanimate trials, $Z = 10.36$, $p < .001$, in real, $Z = 4.31$, $p < .001$, and non-real objects, $Z = 11.02$, $p < .001$, and lower accuracy in trials with non-real compared to real objects, $Z = 4.54$, $p < .001$. Separate tests showed that this advantage was only present in animate trials, $Z = 7.27$, $p < .001$, as opposed to inanimate trials, $Z = 0.94$, $p = .34$. Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each difficulty level to assess the effect of age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14 years, and adults). As shown in Figure 3, animate trials did not steadily progress with age, regardless of whether real, $H(6) = 6.06$, $p = .42$, or non-real objects, $H(6) = 10.02$, $p = .12$, were used. Inanimate trials showed a significant increase in accuracy over time to reach maturity by the age of 13-14 years for real objects, $H(6) = 26.91$, $p < .001$, and 7-8 years for non-real objects, $H(6) = 25.07$, $p < .001$.

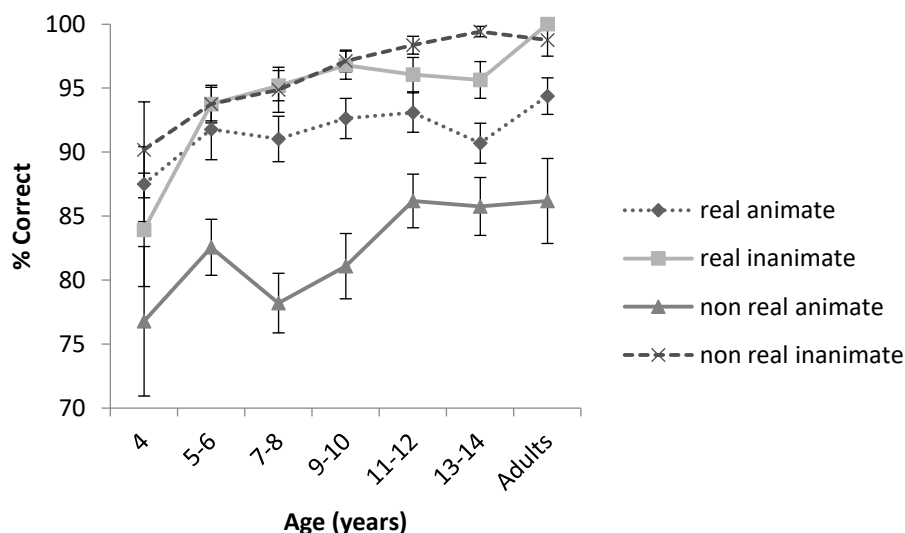


Figure 3. Correct response percentages in the object decision subtest by age and difficulty level. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

Object Completion

Accuracy. Pairwise Wilcoxon comparisons conducted on the percentages of correct responses yielded significant differences between the type of object (animate vs inanimate), $Z = 2.92$, $p = .003$, with lower accuracy in inanimate than animate trials. Kruskal-Wallis tests conducted separately for each difficulty level showed significant increases in accuracy across age (4, 5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14 years, adults) to reach maturity by the age of 9-10 years in both animate objects, $H(6) = 60.16$, $p < .001$, and inanimate objects, $H(6) = 44.01$, $p < .001$, as shown in Figure 4.

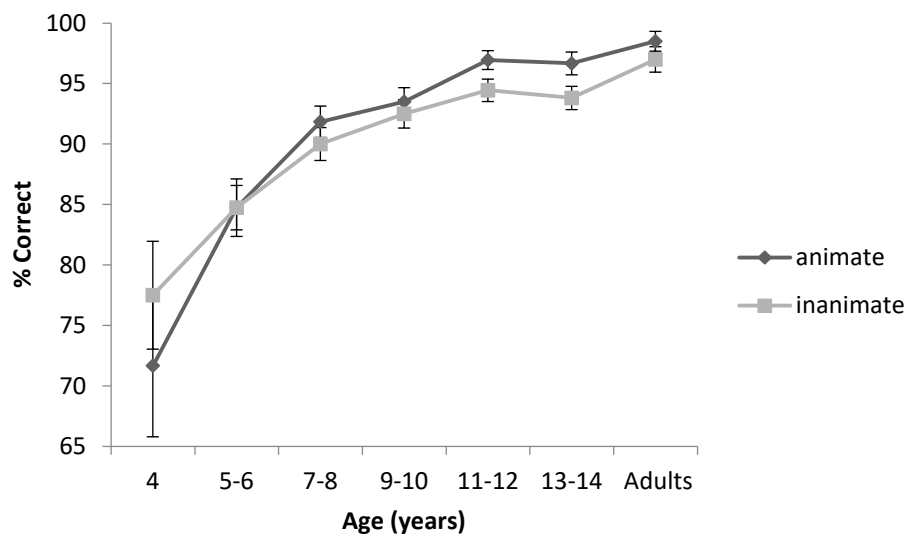


Figure 4. Correct response percentages in the object completion subtest by age and type of object. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

RTs. Pairwise Wilcoxon comparisons showed comparable RTs in animate and inanimate trials, $Z = 0.267$, $p = .79$. Kruskal-Wallis tests showed a significant decrease in RTs with age to reach adult processing speed by the age of 7-8 years in inanimate trials, $H(6) = 32.96$, $p < .001$, and 9-10 years in animate trials, $H(6) = 53.47$, $p < .001$.

Discussion

The aim of this first experiment was to examine the typical development of transformative processes. We tested 4- to 14-year-old children and young adults using three subtests of the BEVPS to specify the developmental trajectories of view-independent object representation and access to stored structural knowledge.

The object constancy, object decision, and object completion subtests showed the significant effect of difficulty according to the different types of trials. As presented in Table 3 below, results showed a significant improvement of accuracy in the three subtests, and a significant decrease in response times with age only in the object completion subtest.

Table 3.

Ages for reaching maturity in the three subtests by difficulty level.

Subtest	Difficulty	Age groups
Object Constancy: Outline Drawings	Low front turn	5-6
	Vertical turn	9-10
	Quarter turn	9-10
	Low back turn	9-10
	About turn	9-10
Object Constancy: Colored Drawings	Vertical turn	5-6
	About turn	5-6
	Low front turn	7-8
	Quarter turn	9-10
	Low back turn	9-10
Object Decision	Non-real inanimate	7-8
	Real inanimate	13-14
	Non-real animate	Ns
	Real animate	Ns
Object Completion	Animate	9-10
	Inanimate	9-10

Note. Ns means that effect of age was not significant.

More specifically, in the object constancy subtest, outline drawings showed lower accuracy but comparable RTs as colored drawings. Many studies also show a color advantage in everyday object recognition (Mapelli & Behrmann, 1997; Tanaka & Presnell, 1999), with this advantage being reinforced in objects with only a few visible structural properties (Bramão et al., 2011) and those from natural categories (Bramão et al., 2011; Nagai & Yokosawa, 2003). In the **outline drawings**, vertical turn trials

showed lower accuracy and slower RTs than other trials. These poorer results could be due to the fact that the drawings were presented from above or below perspectives, thus not respecting the principal axis of the object, while their main features were also hidden. We did not observe any differences in accuracy or RTs between trials with horizontal plane rotations. This could relate to the fact that in these trials, the drawings conserved their principal axis (minimal features view) or main features (foreshortened view) as in the studies of Humphreys and Riddoch (1987b, 2006). Nevertheless, Schendan and Stern (2007) found recognition and categorization to be slower and less accurate when the object rotation differs more from the canonical view.

From a developmental point of view, accuracy reached adult maturity by 9-10 years, except in low front turn trials in which maturity was reached as early as 5-6 years. In general, RTs did not significantly decrease with age. Previous studies (Bezrukikh & Terebova, 2009; Bova et al., 2007; Dekker et al., 2011) showed a significant improvement in accuracy between approximately 5 and 10 years, with a ceiling effect in adulthood from 20 years for photographs of graspable objects presented from an unusual perspective (Dekker et al., 2011). However, none of these studies focused on performances in relation to specific rotations. We found a ceiling effect in our adult sample similarly to Dekker et al. (2011) as well as in children from the age of 9-10 years, except for pictures rotated on the vertical plane. This difference may derive from the varied difficulty of the tasks. In our tasks, participants had to match the prototypical view of the target object to an object presented from an unusual viewpoint among other objects with the same global shape. By contrast, the unusual view task of Bova et al. (2007) is a naming task based on object photographs presented from unconventional points of view.

In the **colored drawings**, quarter turn trials showed lower accuracy and slower RTs compared to the other trials, while vertical turn and low back turn trials resulted in lower accuracy and slower RTs compared to the remaining trials. As in the outline drawings, the lower accuracy observed for vertical turn trials could be due to the fact that these perspectives did not respect the principal axis of the object or present its main features. Moreover, these perspectives modified the color repartition visible in the drawing. As a result, the color advantage was absent for these items. The lower accuracy for the quarter turn and low back turn trials could be because these perspectives did not respect the principal axis (foreshortened view) and thus modified the familiar global

shape of the object (Humphreys & Riddoch, 2006). TD children had better success with items presented from other perspectives that masked the principal features of the objects. To date, no developmental study has shown such dissociation between performances with the foreshortened view and minimal features view. The global score used in the studies of Bova et al. (2007) and Stiers et al. (2001) possibly masked this dissociation despite their use of these different types of items.

From a developmental point of view, accuracy levels reached adult maturity as early as 5-6 years in vertical turn and about turn trials, 7-8 years in low front turn trials, and 9-10 years in quarter turn and low back turn trials, while RTs did not significantly decrease with age. Developmental studies, showing a significant improvement of object constancy between 5 and 10 years, did not focus on the performances obtained for specific perspectives or colored drawings (Bezrukih & Terebova, 2009; Bova et al., 2007; Dekker et al., 2011; Kaess, 1971). Nevertheless, considering the ceiling effect observed in our adult sample similarly to that of Dekker et al. (2011), we showed that the low front turn and about turn trials (minimal features view) are first to reach this ceiling effect at 5-6 years, followed by low back turn, quarter turn, and vertical turn trials (foreshortened view), which reached this ceiling effect between 7 and 10 years.

In the **object decision** subtest, animate trials showed lower accuracy than inanimate trials. Different studies with both child and adult samples showed opposite dissociations. Lawson (1999) and Caramazza and Shelton (1998) found lower accuracy for animate than inanimate objects in different recognition and decision tasks, as in our study. They justified this dissociation by the fact that animals (i.e., animate category) are more visually similar to each other and present similar body parts. By contrast, Bonin, Gelin, and Bugajska (2014) showed higher accuracy for animate compared to inanimate objects for recognition and recall tasks. They postulated that animate objects attract more attention, meaning that any changes would be detected more quickly and accurately than for inanimate objects. They justified this dissociation by three processes, namely a better mechanism of attentional capture, a better elaborative encoding process, and/or a better quality and stability of mnemonic traces. In our study, real trials showed higher accuracy than non-real trials, but only for animate objects. In an adult sample using three-dimensional shapes, Cooper et al. (1992) also showed the advantage of possible (real) items over impossible (non-real) ones.

From a developmental perspective, accuracy did not increase with age in animate trials and did not reach the ceiling effect regardless of the age group. In non-real inanimate trials, accuracy levels reached adult maturity at 7-8 years and the ceiling effect at 9-10 years. In real inanimate trials, accuracy levels reached the ceiling effect at 7-8 years but only slightly increased until 13-14 years. Bova et al. (2007) showed a significant increase in accuracy between 6 and 11 years in terms of object constancy after adapting the object decision task of the BORB (1993), but they did not dissociate performances in animate and inanimate trials.

Lastly, in the **object completion** subtest, animate trials showed higher accuracy but comparable RTs as inanimate trials. Humphreys and Riddoch (2006) also showed this dissociation, with better accuracy being observed with animate objects in a completion task with an adult sample, while Caramazza et al. (1998) showed the opposite dissociation. From a developmental point of view, accuracy levels reached adult maturity at 9-10 years in animate and inanimate trials, while RTs reached adult maturity at 7-8 and 9-10 years in inanimate and animate trials, respectively. Object completion tasks were mainly used in studies with brain-damaged adults (Humphreys and Riddoch, 2006). To the best of our knowledge, only Vilayphonh et al. (2009) used a completion task in a child sample, but their task showed a ceiling effect from the age of 4-6 years.

To sum up, this study is the first to investigate the entire developmental trajectory of view-independent object representation and access to stored structural knowledge from childhood to adulthood. It highlights distinct evolutions in terms of accuracy for the different levels of difficulty for each process. Moreover, in the object constancy subtest, our results showed a color advantage as well as a significant advantage for the recognition of minimal view items (hidden main features and visible principal axis) compared to foreshortened view items (elongated principal axis and visible main features). Interestingly, the animate-inanimate distinction leads to opposite results in the object decision subject (animate lower than inanimate) compared to the object completion subtest (animate better than inanimate). This opposite dissociation could be due to the implication of different processes, the use of different images from distinct semantic categories, and different response modalities in the two subtests. The object decision task supposes the access to stored structural knowledge and requires an affirmative/negative response, while the object completion task supposes the access to

stored structural knowledge and visual closure and requires a matching response. By contrast, this opposite dissociation was also observed in different studies with adult samples using different object decision tasks.

Based on these distinct trajectories of typical development, Experiment 2 will use the same three subtests to examine how children with CP processed the view-independent object representation and access to stored structural knowledge. Indeed, we already know that children with CP show deficits in these transformative processes (Fazzi et al., 2004, 2009, 2012; Stiers et al., 2002), although none of these previous studies has focused on the differential effects of color, depth rotation, and animate-inanimate distinction on children's accuracy.

EXPERIMENT 2

In Experiment 2, by contrasting the performances of CP and TD children, the aim is first to determine whether CP children show global or selective impairments, and then to establish whether these impairments are specific. Impairments are considered to be specific when CP children show significant deficits in comparison with TD children matched on both chronological age and nonverbal reasoning abilities, because this would indicate that the observed visual perceptual deficits are not caused by their intellectual limitations. Finally, this experiment also seeks to determine whether these impairments are persistent in time in children's atypical development.

Methods

Participants

A total of 86 children aged 5 to 14 years with a diagnosis of spastic CP took part in Experiment 2. All selected children suffered from prenatal or perinatal brain damage whether due to premature birth or not. They were native French speakers, predominantly Caucasian, and with middle to high socioeconomic status. They were recruited in different rehabilitation and reference centers specialized in CP in the Walloon Region and Brussels (Belgium). Children with and without mental retardation were included provided that they succeeded the control matching task (see Experiment 1), which aimed to ensure that they were able to understand the task instructions that

required participants to match basic geometrical shapes with different shapes, colors, and sizes. Participants were selected based on the following exclusion criteria: the presence of head injury, meningitis, epileptic encephalopathy, or abnormal cerebral development such as neuronal migration disorder and corpus callosum agenesis. Table 4 below provides an overview of the main characteristics of CP children as collected from medical records and questionnaires completed by parents or caregivers. More than half of the children were born prematurely (i.e., 57 %), 43% of whom were very preterm and 14% extremely preterm. Overall, 54 children were born with a low birth weight, of whom 37% had a very low birth weight and 11% an extremely low birth weight. Regarding motor disorders, 20% of children were diagnosed with diplegia and 20% with quadriplegia, while 30% had right hemiplegia and 30% left hemiplegia. Furthermore, 80% of the children could walk with no or only some restrictions, while the remaining 20% deambulated with a mobility device (hand-held or powered). A total of 20% of children suffered from epilepsy and were under drug treatment. Two-thirds of children presented one or more neuro-ophthalmological disorders such as strabismus (39%) and astigmatism (26%). Regarding their education, two-thirds of children were enrolled in mainstream schools, while the remaining attended schools providing special needs support.

Each child with CP was individually matched with two TD children who took part in Experiment 1, one matched for chronological age (± 1 month) and the other for nonverbal mental age as assessed using the Progressive Matrices of Raven (no more than 1 point raw score difference within the matching pair). This matching procedure led to the constitution of two groups of TD children: one group of 86 TD children matched for chronological age (TDca group, 47 females, mean age = 115.5 ± 36.04 months [5 years – 14 years 11 months], Raven mean raw score = 34.17 ± 11.92) and one group of 86 TD children matched for nonverbal reasoning abilities (TDnv group, 47 females, mean age = 95.77 ± 30.89 months [4 years 1 month – 14 years], Raven mean raw score = 28.95 ± 9.81). As expected, children with CP (44 females, mean age = 115.58 ± 36.19 months [5 years – 14 years 11 months], Raven mean raw score = 29.08 ± 9.73) differed from the TDnv group in terms of chronological age, $t(85) = 3.861$, $p < .001$, but not from the TDca group, $t(85) = -0.159$, $p = .8$. Conversely, they differed from the TDca group in terms of nonverbal reasoning, $t(85) = -3.069$, $p = .002$, but not from the TDnv group, $t(85) = -0.107$, $p = .91$.

Table 4.

Main characteristics of children with cerebral palsy.

Characteristics		N			N
Age & gender	Young (5, 6, 7, 8, 9)	43 (23/20)	Gestational age	≥37 weeks	37
	Old (9, 10, 11, 12, 13, 14)	43 (19/24)		33-36 weeks	21
Motor disorder	Diplegia	17	Birth weight	28-32 weeks	21
	Right hemiplegia	27		<28 weeks	7
	Left hemiplegia	25		+2500 g	40
	Quadriplegia	17		1500-2500 g	24
GMFCS	Level I	54	Epilepsy	1000-1500 g	17
	Level II	16		750-1000 g	5
	Level III	9		Yes	17
	Level IV	7		No	69
Cerebral lesion	Right PVL	6	Ophthalmic disorders	Myopia	9
	Right PVL + sub-cortical lesions	4		Hypermetropia	15
	Left PVL	8		Strabismus	30
	Left PVL + sub-cortical lesions	2		Astigmatism	20
	Left PVL + cortico-sub-cortical lesions	2		Amblyopia	3
	Bilateral PVL	24		Nystagmus	4
	Sub-cortical lesions	7	Schooling	Visual field impairment	2
	Cortico-sub-cortical lesions	15		No impairment	32
	No lesion	4		Mainstream	63
	No information	14		Special education	23

Note. PVL = periventricular leukomalacia, GMFCS = global motor functional classification scale; Level I = walk without restrictions, Level II = walk with some restrictions, Level III = walk with hand-held mobility device, Level IV= autonomous powered mobility.

Materials, Tasks and Stimuli, and Procedure

The materials, tasks and stimuli, and procedure were exactly the same as described in Experiment 1.

Results

As in Experiment 1, all computations were performed using the R software (R Core Team, 2016) and Statistica 13 software. Mean percentages of correct responses, median RTs, and standard deviations are reported in Appendices D, E, and F by group, difficulty level, and subtests. Two sets of analyses were performed on the data: (1) group effect analyses to examine the group differences in each task, and (2) developmental analyses comparing the developmental curves in the CP and TDca groups to evaluate the persistence of transformative visual perceptual impairments across development.

Group Effect Analysis

Accuracy and RT data did not fit a normal distribution despite the data being subjected to natural logarithm transformations. For this reason, we used non-parametric tests. Friedman and Kruskal-Wallis tests (with a significance level of 5%) were conducted to respectively test the effects of difficulty and group first on the correct response percentages and then on RTs for each difficulty level of the three subtests. Considering that the effects of difficulty and group might be influenced by age, a median-split procedure based on age was applied to split the sample of children with CP into two groups contrasting younger (5, 6, 7, 8, 9 years) and older children (9, 10, 11, 12, 13, 14 years).

Object Constancy

Accuracy. Pairwise Wilcoxon test conducted on percentages of correct responses showed lower accuracy in outline compared to colored drawings, $Z = 6.93$, $p < .001$. Friedman tests yielded significant differences between the degree of rotation (vertical turn, low front turn, quarter turn, low back turn, about turn) in outline, $\chi^2 = 198.91$, $p < .001$, and colored drawings, $\chi^2 = 26.318$, $p < .001$. In the **outline drawings** task, pairwise Wilcoxon comparisons indicated the lowest accuracy in vertical turn trials and the highest accuracy in about turn trials ($ps < .001$). Quarter turn and low front turn trials showed comparable accuracy, but these were lower than low back turn trials ($ps < .001$). In the **colored drawings** task, pairwise Wilcoxon comparisons indicated the lowest accuracy in quarter turn trials and the highest accuracy in about turn trials ($ps < .001$). Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), showed a significant increase in accuracy between young and old children in both outline, $Z = -4.23$, $p < .001$, and colored drawings, $Z = -4.29$, $p < .001$. As shown in Figure 5, Kruskal-Wallis tests, conducted separately for each level of difficulty to assess the group effect (CP, TDca, and TDnv), showed significant differences in terms of accuracy in outline and colored drawings. Statistical values are presented in Table 5.

Table 5.

Statistical values of Kruskal-Wallis tests to assess the group effect in the object constancy test.

	Outline drawings		Colored drawings	
	Young group	Old group	Young group	Old group
Vertical turn	$H(2,129) = 15.63$ $p < .001$	$H(2,129) = 17.69$ $p < .001$	$H(2,129) = 5.11$ $p < .001$	$H(2,129) = 6.23$ $p = .04$
Low front turn	$H(2,129) = 4.31$ $p = .04$	$H(2,129) = 4.21$ $p = .12$	$H(2,129) = 5.47$ $p = .06$	$H(2,129) = 10.45$ $p = .005$
Quarter turn	$H(2,129) = 6.41$ $p = .04$	$H(2,129) = 14.58$ $p < .001$	$H(2,129) = 5.52$ $p = .06$	$H(2,129) = 2.46$ $p = .29$
Low back turn	$H(2,129) = 2.005$ $p = .37$	$H(2,129) = 13.39$ $p = .001$	$H(2,129) = 4.31$ $p = .11$	$H(2,129) = 1.09$ $p = .58$
About turn	$H(2,129) = 16.92$ $p < .001$	$H(2,129) = 4.98$ $p = .08$	$H(2,129) = 1.43$ $p = .49$	$H(2,129) = 2.15$ $p = .34$

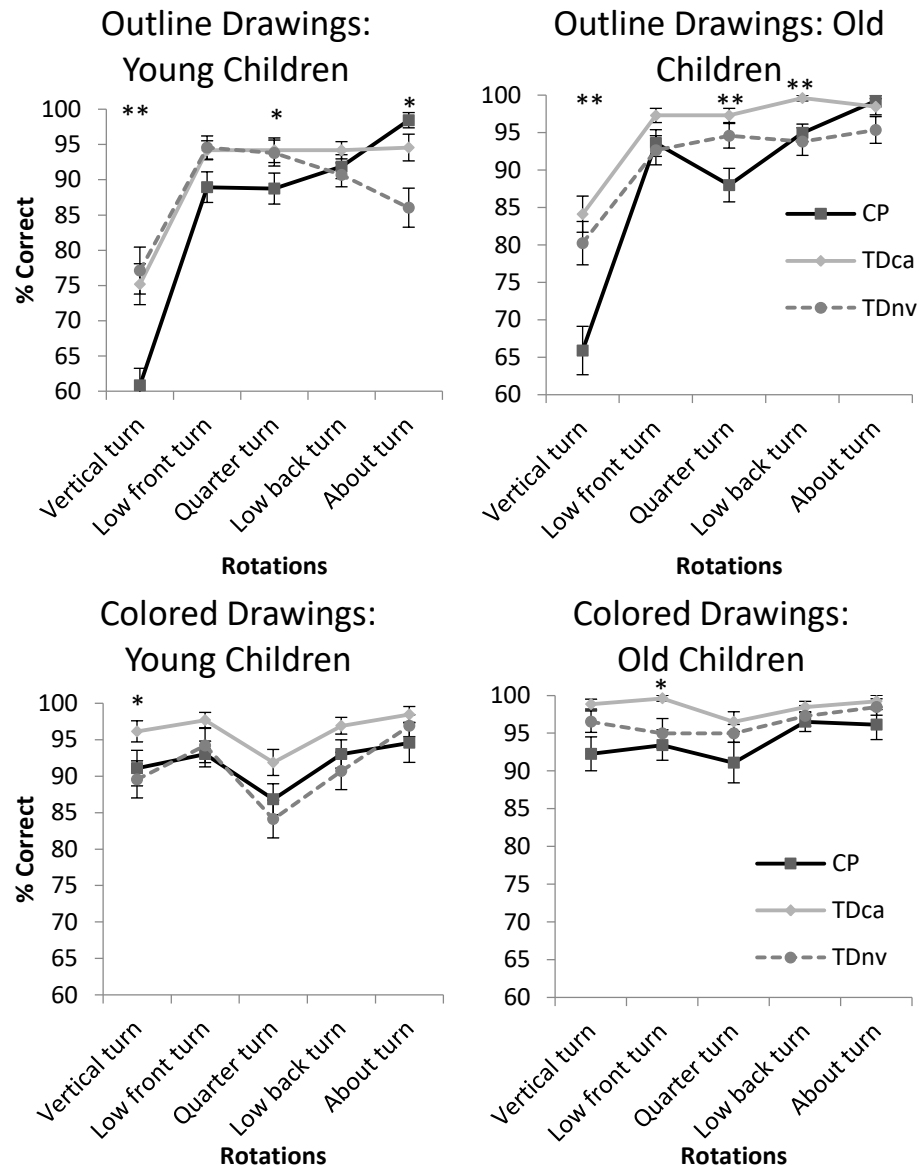


Figure 5. Correct response percentages in the outline and colored drawings of the object constancy subtest by age and level of difficulty. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

* represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between CP and TDca children.

** represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between CP, TDca, and TDnv children.

RTs. The Wilcoxon test conducted on median RTs showed slower RTs in outline compared to colored drawing trials, $Z = 2.86$, $p < .004$. Friedman tests yielded a significant difference in terms of the degree of rotation (vertical turn, low front turn, quarter turn, low back turn, about turn), $\chi^2 = 129.70$, $p < .001$. In outline drawings, pairwise Wilcoxon comparisons indicated slower RTs in vertical turn, low front turn, and quarter turn trials than low back turn and about turn trials ($ps < .001$). In colored drawings, these comparisons indicated slower RTs in quarter turn and vertical turn trials than low front turn trials ($ps < .001$), while fastest RTs occurred in about turn and low back turn trials ($ps < .001$). Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), showed a significant decrease in RTs between younger and older children in outline, $Z = 3.27$, $p = .001$, and colored drawings, $Z = 4.99$, $p < .001$. Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each level of difficulty to assess the group effect (CP, TDca, and TDnv). In the young group, children with CP showed comparable RTs as TD children in all rotations for outline and colored drawings ($ps > .10$). In the old group, however, children with CP showed slower RTs than TDca children in low front turn, quarter turn, and low back turn trials in outline drawings and in vertical turn, low front turn, quarter turn, and low back turn trials in colored drawings ($ps < .007$).

Object Decision

Accuracy. Pairwise Wilcoxon comparisons conducted on percentages of correct responses showed lower accuracy in non-real trials than real trials, $Z = 5.91$, $p < .001$, for both animate, $Z = 5.51$, $p < .001$, and inanimate objects, $Z = 2.38$, $p = .017$, and lower accuracy for animate compared to inanimate objects, $Z = 7.39$, $p < .001$, in the two parts of the subtest, notably in real, $Z = 4.07$, $p < .001$, and non-real trials, $Z = 6.69$, $p < .001$. Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), did not show any significant increase in accuracy between young and old children in the real animate, $Z = -0.03$, $p = .98$, real inanimate, $Z = -1.77$, $p = .08$, non-real animate, $Z = -1.09$, $p = .27$, and non-real inanimate trials, $Z = -0.89$, $p = .37$. Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each difficulty level to assess the group effect (CP, TDca, and TDnv).

For real objects, CP children showed comparable accuracy as TDca and TDnv children in animate trials, $H(2,258) = 0.037$, $p = .98$, but higher accuracy than TDca and TDnv children in inanimate trials, $H(2,258) = 9.81$, $p = .007$. Regarding non-real objects, CP children showed lower accuracy than TDca and TDnv children in animate trials, $H(2,258) = 18.77$, $p < .001$, but comparable accuracy as TDnv children in inanimate trials, $H(2,258) = 7.82$, $p = .02$.

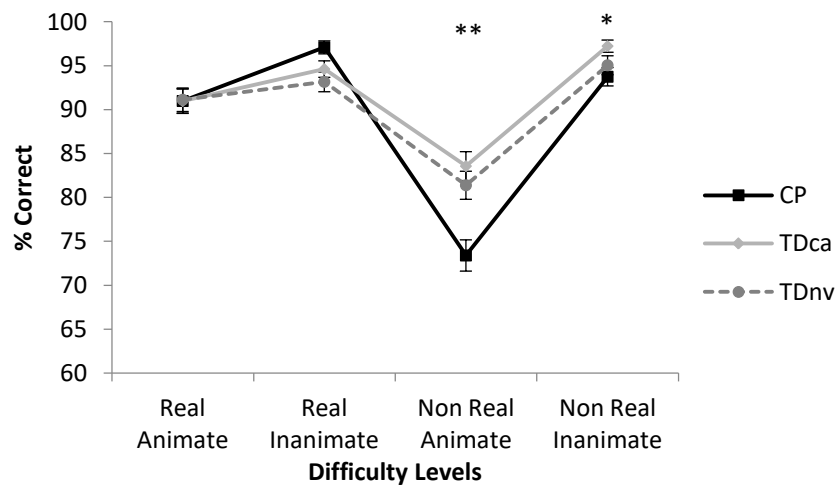


Figure 6. Correct response percentages in the object decision subtest by age and difficulty level. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

* represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between CP and TDca children.

** represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between CP, TDca, and TDnv children.

Object Completion

Accuracy. Pairwise Wilcoxon comparisons conducted on percentages of correct responses showed lower accuracy in inanimate compared to animate trials, $Z = 2.70$, $p = .007$. Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), showed a significant increase in accuracy between young and old children in both animate, $Z = -3.16$, $p = .001$, and inanimate trials, $Z = -3.62$, $p < .001$. Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each difficulty level to assess the group effect (CP, TDca, and TDnv). In animate trials, CP children showed comparable accuracy as TDca and TDnv children in the young group, $H(2,128) = 2.69$, $p = .26$, but lower accuracy than

TDca children in the old group, $H(2,129) = 9.08$, $p = .01$. In inanimate trials, they showed comparable accuracy as TDca and TDnv children in the young group, $H(2,129) = 1.8$, $p = .40$, but lower accuracy than TDca children in the old group, $H(2,129) = 8.41$, $p = .01$.

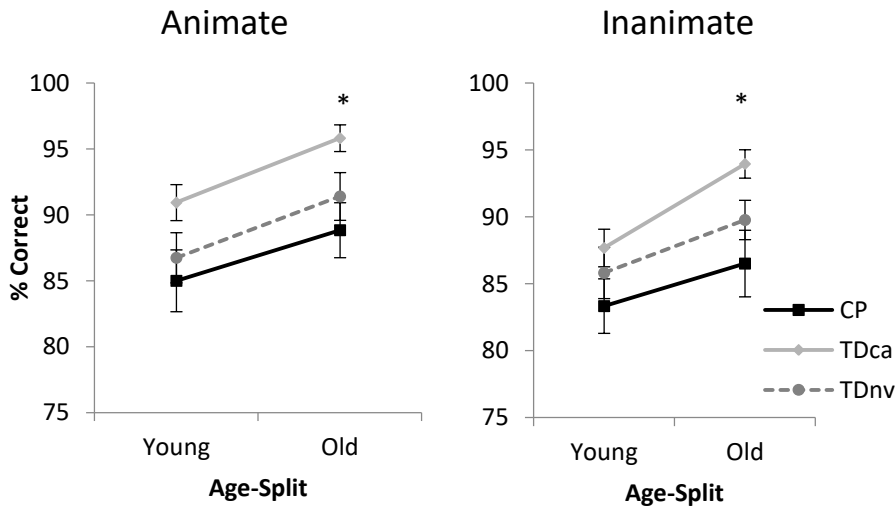


Figure 7. Correct response percentages in the object decision subtest by age and difficulty level. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point. * represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between CP and TDca children. ** represents significant difference in accuracy (with a significance level of 5%) between CP, TDca, and TDnv children.

RTs. Pairwise Wilcoxon comparisons conducted on percentages of correct responses showed comparable RTs in animate and inanimate trials, $Z = 1.15$, $p = .25$. Mann-Whitney tests, conducted to assess the age-split effect (young, old), showed a significant decrease in RTs between young and old children in both animate, $Z = 3.79$, $p < .001$, and inanimate trials, $Z = 3.08$, $p = .002$. Kruskal-Wallis tests were conducted separately for each difficulty level to assess the group effect (CP, TDca, and TDnv). In animate trials, CP children showed comparable RTs as TDca and TDnv children in both young, $H(2,129) = 0.035$, $p = .98$, and old groups, $H(2,129) = 4.23$, $p = .12$. In inanimate trials, they likewise showed comparable RTs as TDca and TDnv children in both young, $H(2,129) = 0.45$, $p = .79$, and old groups, $H(2,129) = 1.49$, $p = .47$.

Developmental Analysis

In this part, we compare the developmental trajectories of children with CP and TDca children in order to determine how CP affects the developmental trajectory of transformative visual perceptual processing. To this aim, regression analyses (with a significance level of 5%) were conducted on the probabilities of success in each subtest to test the effects of group (CP, TDca), age (5-6, 7-8, 9-10, 11-12, 13-14 years), and their possible interaction. These analyses determine how between-group differences evolve with age.

Object Constancy

Concerning the **outline drawings**, logistic regression analysis revealed a significant effect of group and age as well as a significant interaction between age and group, $G^2 = 15.72$, $df = 4$, $p = .003$. The probability of success was higher in TDca than CP children, and it did not improve in the same way across age in the two groups. In TDca children, their probability of success significantly increased between 7-8 and 9-10 years ($p < .001$), but stagnated from 5-6 to 7-8 years ($p = .30$), and from 9-10 years to 13-14 years ($ps > .10$). In children with CP, their probability of success significantly increased between 7-8 and 13-14 years ($p = .05$), but stagnated between 9-10 and 11-12 years ($ps > .10$). The group effect was significant from 5-6 years ($p < .001$), while it varied but did not increase with age ($p = .22$), thus confirming the presence of a persistent delay in children with CP. Further, 13-14-year-old CP children showed similar probabilities of success as 7-8-year-old TD children, but significantly lower probabilities of success than TD children aged 9-10 years ($p < .001$) and older ($ps < .002$).

Concerning the **colored drawings**, logistic regression analysis revealed a significant effect of group, $G^2 = 35.46$, $df = 1$, $p < .001$, and age, $G^2 = 32.9$, $df = 4$, $p < .001$, but without a significant interaction between age and group, $G^2 = 8.36$, $df = 4$, $p = .08$. The probability of success was higher in TDca than CP children, with the group effect being significant from 5-6 years and remaining stable until 13-14 years, thus confirming the presence of a stable and persistent delay in children with CP. The probabilities of success significantly increased between 5-6 and 13-14 years ($p < .001$), but stagnated between 5-6 and 7-8 years ($p = .09$) and between 9-10 and 13-14 years ($ps > .05$). CP children aged 13-14 years showed similar probabilities of success as 7-8-year-old TD

children, but significantly lower probabilities of success than those aged 9-10 years ($p = .003$) and older ($ps < .05$).

Object Decision

Logistic regression analysis revealed a significant effect of group, $G^2 = 12.25$, $df = 1$, $p < .001$, but no effect of age, $G^2 = 8.49$, $df = 4$, $p = .07$, or significant interaction between age and group, $G^2 = 1.8$, $df = 4$, $p = .77$. The probability of success was higher in TDca than CP children, while the group effect was significant from 5-6 years and remained stable until 13-14 years, thus confirming the presence of a stable and persistent delay in children with CP. Their probability of success did not increase with age. Given the presence of a group effect and absence of an age effect, children with CP aged 13-14 years showed significantly lower probabilities of success than TD children aged 5-6 years and older.

Object Completion

Logistic regression analysis revealed a significant effect of group, $G^2 = 24.29$, $df = 1$, $p < .001$, and age, $G^2 = 50.65$, $df = 4$, $p < .001$, but no significant interaction between age and group, $G^2 = 4.93$, $df = 4$, $p = .29$. The probability of success was higher in TDca than CP children, while the group effect was significant from 5-6 years and remained stable until 13-14 years, confirming the presence of a stable and persistent delay in children with CP. The probability of success significantly increased between 5-6 and 13-14 years ($p < .001$), but stagnated between 9-10 and 13-14 years ($ps > .15$). Children with CP aged 13-14 years showed similar probabilities of success as 7-8-year-old TD children, but significantly lower probabilities of success than TD children aged 9-10 years ($p = .02$) and older ($ps < .05$).

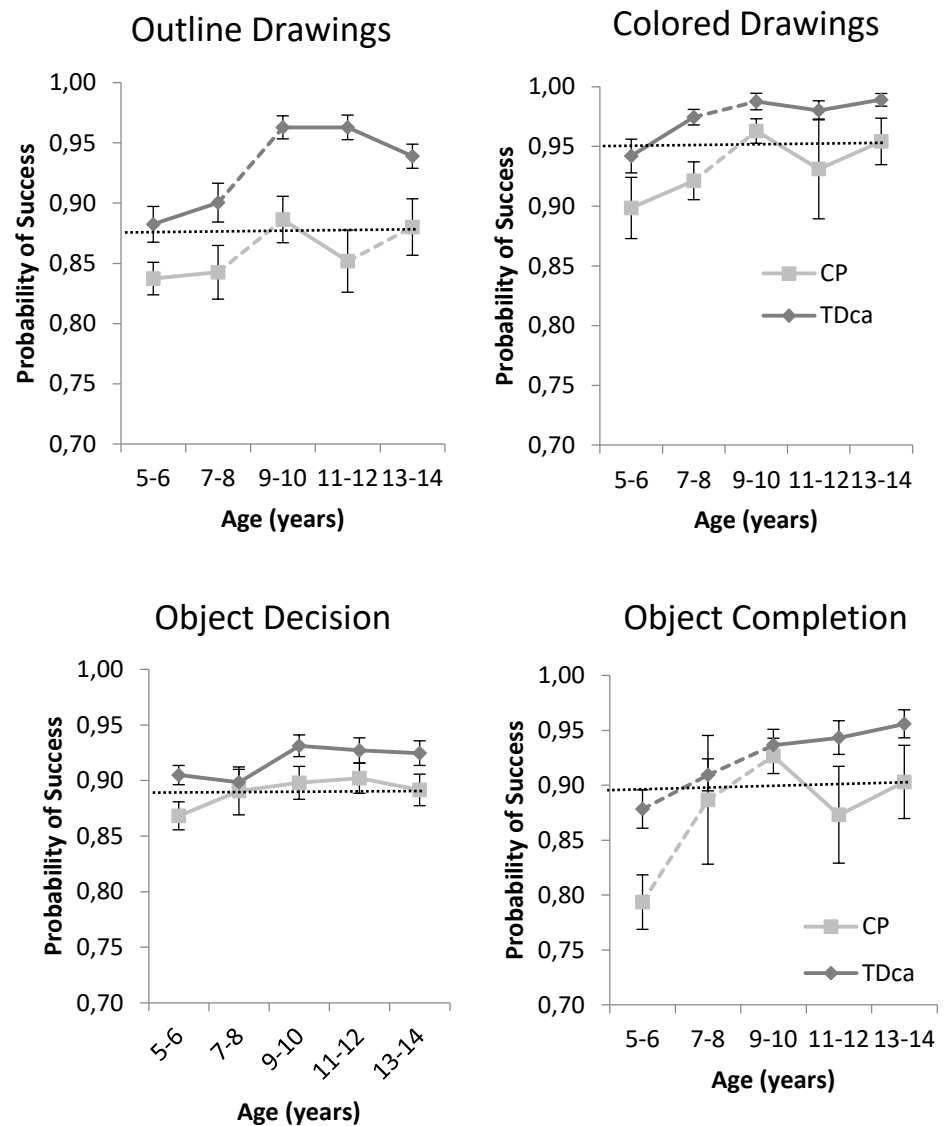


Figure 8. Probabilities of success in the object constancy, object decision, and object completion subtests by age and difficulty level. Standard errors are represented in the figure by the error bars attached to each point.

..... represents the level of probability of success reached by that age of 13-14 years in children with CP.

--- represents the interval of age in which performance increases significantly.

Discussion

The aims of this second experiment were first to determine whether children with CP present a selective or global impairment in late visual perceptual processing compared to TDca and TDnv children. Second, it aimed to examine the developmental trajectory of their impairment to determine whether the observed difficulties reflect a simple developmental delay or a persistent deficit across development. The third and final aim was to examine the impact of difficulty levels on the performances of CP children in transformative visual perceptual processing.

The **first aim** of this study was to assess the selectivity and specificity of transformative visual perceptual impairments. With regard to **selectivity**, the pattern of results across tasks revealed that children with CP performed worse than TDca children in the object constancy, object decision, and object completion subtests except for some levels of difficulty. In the outline drawings of the object constancy subtest, CP children showed comparable accuracy in low front turn, low back turn, and about turn trials, and comparable RTs in all trials in the young group. In the colored drawings, only young children with CP showed comparable accuracy and RTs in all trials. In the object decision subtest, children with CP showed comparable accuracy in real animate trials, while in the object completion subtest, only the young group showed comparable accuracy and RTs in all trials. This would indicate that late visual perceptual processing is globally impaired in children with CP even if some difficulty levels were not impaired, and that their impairments worsened with age (i.e., older children have more impairments than younger ones). All previous studies (Fazzi et al., 2004, 2009; Menken et al., 1987; Stiers et al., 2002) showed significant impairments in the view-independent object representation, ranging from 17% to 36% of children with CP. Moreover, Fazzi et al. (2009) showed significant impairments in 64% of their sample of premature children with spastic diplegia for access to stored structural knowledge.

The assessment of impairment **specificity** revealed that CP and TDnv children performed similarly with a few exceptions. In the outline drawings of the object constancy subtest, CP children performed worse than TDnv children in the vertical turn and quarter turn trials, corresponding to the foreshortened view (elongated principal axis). In the object decision task, CP children with performed worse than TDnv children in the non-real animate items. Lastly, older children with CP performed worse in all

trials of the object completion subtest. Hence, children with CP showed specific impairments in processing foreshortened view representations of objects and accessing stored structural knowledge with regard to animate objects (all age groups) and inanimate objects (older age groups). Concerning the view-independent representation of objects, Stiers et al. (2002) also revealed specific impairments in children with CP (17% diplegic, 18% hemiplegic, and 19% quadriplegic) when compared to TD children matched on nonverbal reasoning abilities. They used the unconventional view subtest of the L94, which includes several items presenting objects varying from a foreshortened view to a prototypical view every three seconds. Nevertheless, their use of a global score prevents us from knowing whether the observed deficits relate to difficulties with the foreshortened view, minimal feature view, or speed of item presentation. Concerning the access to stored structural knowledge, no study to our knowledge has assessed the specificity of impairments in children with CP. In fact, the only study examining object decision in this population (Fazzi et al., 2009) matched CP children with TDca children.

The **second aim** of this experiment was to assess the persistence of deficits exhibited by children with CP. Developmental analyses revealed the presence of deficits in all age groups for the view-independent object representation and access to stored structural knowledge. The comparison of developmental curves revealed lower probabilities of success for CP than TDca children from the age of 5-6 years in the three subtests. These comparisons also revealed different independent developmental curves in CP and TDca children. In the object constancy subtest, children showed the same patterns of probabilities in outline and colored drawings. TDca and CP children showed a significant improvement in their probabilities of success between 5 and 14 years, with a period of stagnation between 5-6 and 7-8 years, and then 9-10 and 13-14 years. In the object decision subtest, the probabilities of success of the two groups of children did not progress with age. In the object completion subtest, TDca and CP children showed a significant improvement in these probabilities between 5 and 14 years, which was more pronounced between 5-6 and 7-8 years. In the object constancy and object completion subtests, 13-14-year-old CP children showed lower probabilities of success than 9- to 14-year-old TD children, while in the object decision subtest, they showed lower probabilities than 5- to 14-year-old TD children. These results confirm that children with CP present persistent deficits across age and not simply a

developmental delay for the view-independent object representation and access to stored structural knowledge.

The **third aim** of this study was to determine the impact of difficulty levels on the performances of children with CP. A significant effect of difficulty emerged in this respect. In the view-independent object recognition assessed using the object constancy subtest, the same color advantage was observed as with TD children in Experiment 1. Moreover, better accuracy was observed for the minimal feature view (about turn, low front turn) than the foreshortened view (vertical turn, low back turn, quarter turn), as was the case with TD children. In the object decision and object completion subtests, the opposite results were observed in the animate-inanimate distinction. Similarly to TD children but with systematic lower accuracy, CP children showed lower accuracy with animate items in the object decision subtest, but higher accuracy with animate items in the object completion subtest. Hence, children with CP showed the same pattern as TD children concerning the color and principal axis advantages in visual object recognition as well as the opposing animate-inanimate dissociation. Nevertheless, no study to date with TD or CP children has focused on the color advantage, minimal feature view advantage, or animate-inanimate distinction. In the case studies on brain-damaged adults, the observed impairments did not respect the strict dissociation of animate-inanimate objects as found in our study, but they instead used superordinate semantic categories such as animals, clothing, furniture, vegetables, tools, and so forth (Caramazza et al., 1998; Humphreys and Riddoch, 2006). Moreover, according to the location of the brain lesion, patients with right parietal damage showed deficits with the foreshortened view, while those with bilateral occipital damage showed deficits with the minimal features view (Humphreys and Riddoch, 2006).

To sum up, this second experiment highlights that children with CP showed global and specific impairments. In fact, they showed significant impairments in the three tasks assessing view-independent object representations and access to stored structural knowledge, even if certain difficulty levels were preserved. Moreover, although these impairments are significant and persistent in time, meaning that CP children do not reach the performance level of TD children in the two assessed processes, TD children and CP children showed the same color advantage, principal axis advantage, and animate-inanimate dissociation in visual object recognition.

GENERAL DISCUSSION

The present study addresses two issues concerning the development of late visual perceptual processes, namely view-independent object representation and access to stored knowledge in TD and CP children using the object constancy, object decision, and object completion subtests of the BEVPS.

The comparison of performances between child groups showed particular profiles according to the age groups and difficulty levels of the tasks. In fact, TD and CP children showed a color advantage as well as a minimal feature view advantage (preservation of the principal axis) in visual object recognition. They also showed a clear animate-inanimate dissociation in opposite ways according to the processes that underlie the tasks. In addition, this study showed the importance of assessing these difficulty levels at different ages, because TD children showed distinct developmental trajectories, while CP children presented global and specific profiles of impairments. Nevertheless, it is important to dissociate the different difficulty levels to specify a profile of impaired and preserved transformative processes and thus best adapt school learning and individual rehabilitation programs.

Considering the different difficulty levels included in the three subtests, future research could increase the difficulty of the object constancy subtest by changing the response modalities from matching to naming tasks to avoid any visual cues that may simplify the view-independent object representation. Then, by considering the double dissociation between animate and inanimate trials presented in the object decision and object completion subtests, it could be interesting to create two new subtests using the same semantic categories and trials but presented differently according to the tasks, which would assess whether the same opposing animate-inanimate dissociation is present. Lastly, these subtests could also be used in children with other neurodevelopmental pathologies such as Williams's syndrome, 22q11.2 syndrome, and epileptic encephalopathy to precisely define their visual perceptual processing and adapt their rehabilitation programs.

One limitation of this study, as in Schmetz et al. (studies 2 and 3 in this thesis), is that it restricts the sample to children with spastic CP, with the aim to reduce the heterogeneity inherent to this pathology. Future studies should thus be extended to children with other forms of CP. They should also increase the sample size to

determine which factors (i.e., prematurity, birth weight, location of motor disorder, brain lesion, type of neurovisual disorder) influence or degrade visual perceptual processing. Further studies could also include adolescents and adults with CP to determine if late visual perceptual processing improves at a later stage than in typical development. Finally, basic visual-spatial processing will be considered in future research in TD and CP children in order to compare visual perceptual and spatial processing from a developmental perspective and in relation to CP.

APPENDICES

Appendix A.

Descriptive statistics with mean percentages of correct responses, median reaction times, and standard deviations for each difficulty level of the object constancy subtest according to the seven age groups in the typically developing group.

		Accuracy data													
	Rotations	4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		Adults	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Outline drawings	Vertical turn	73.81	26.73	70.61	20.66	73.08	18.18	83.33	15.98	87.84	16.03	86.82	15.24	86.67	10.26
	Low front turn	82.14	23.08	92.54	12.07	94.44	9.62	96.49	6.89	97.3	6.23	95.35	8.39	98.33	5.13
	Quarter turn	79.76	23.73	92.11	11.45	93.59	10.55	96.93	6.55	97.3	6.23	97.67	5.84	99.17	3.73
	Low back turn	75	19.34	93.86	8.15	94.02	8.96	98.68	4.55	99.55	2.74	97.29	6.23	100	0
	About turn	71.43	22.1	91.23	16.77	94.02	12.96	99.12	5.41	100	0	96.9	9.8	100	0
Colored drawings	Vertical turn	71.43	25.68	89.91	15.27	96.58	7.82	97.81	6.9	99.1	3.82	98.84	4.3	97.5	6.11
	Low front turn	77.38	30.39	95.18	9.42	97.01	7.52	98.68	4.55	98.65	4.61	98.45	6.1	100	0
	Quarter turn	67.86	21.15	87.28	13.1	91.45	13.17	98.25	6.47	96.4	8.9	95.74	8.98	99.17	3.73
	Low back turn	71.43	25.68	94.3	9.71	96.58	7.82	99.56	2.7	97.3	7.36	98.84	4.3	100	0
	About turn	80.95	28.39	96.49	10.37	100	0	99.12	5.41	100	0	100	0	100	0

		Median reaction times (ms)													
	Rotations	4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		Adults	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Outline drawings	Vertical turn	2401	2512	1979	2557	1961	2122	1555	3045	1898	2297	2057	1472	1566	1673
	Low front turn	1916	2208	1519	1202	1352	993	1652	947	1787	1038	1307	1352	1247	1194
	Quarter turn	2023	1533	1859	1429	1565	1105	1799	974	1680	1615	1355	1109	1395	1224
	Low back turn	1841	1104	1322	1102	1415	889	1270	1393	1565	1553	1222	1000	954	930
	About turn	2415	2958	1719	2738	1412	1024	1389	1092	1945	1986	1206	1531	954	2148
Colored drawings	Vertical turn	1742	2577	2079	2368	1676	1878	1764	2134	1897	1579	1753	1871	1270	1398
	Low front turn	1865	1281	1483	2015	1284	1077	1504	1627	1528	1357	1513	1423	1403	1701
	Quarter turn	1920	2316	1909	1712	1668	1482	1665	1610	1720	1011	1663	1822	1316	2006
	Low back turn	1600	1634	1823	1266	1282	1113	1235	1995	1220	1242	1142	2158	1120	759
	About turn	1449	1376	1286	1347	1248	1137	1233	1398	1335	1769	1464	1813	1107	953

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix B.

Descriptive statistics with mean percentages of correct responses and standard deviations for each difficulty level of the object decision subtest according to the seven age groups in the typically developing group.

Difficulty levels	4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		Adults	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Real animate	87.5	10.96	91.78	14.61	91.03	11.09	92.63	9.82	93.09	9.51	90.7	10.24	94.38	6.38
Real inanimate	83.93	16.57	93.75	9.07	95.19	7.38	96.79	6.86	96.05	8.27	95.64	9.4	100	0
Non-real animate	76.79	21.85	82.57	13.49	78.21	14.54	81.09	15.93	86.18	12.93	85.76	14.84	80	14.85
Non-real inanimate	90.18	14.02	93.75	8.09	94.87	11	97.12	5.34	98.36	4.28	99.42	2.66	98.75	5.59

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix C.

Descriptive statistics with mean percentages of correct responses, median reaction times, and standard deviations for each difficulty level in the object completion subtest according to the seven age groups in the typically developing group.

Accuracy data														
Difficulty levels	4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		Adults	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Animate	71.67	11.76	84.74	4.75	91.84	2.60	93.50	2.33	96.94	1.56	96.67	1.89	98.50	1.64
Inanimate	77.50	8.92	84.74	3.67	90.00	2.72	92.50	2.35	94.44	1.86	93.81	1.92	97.00	2.10

Median reaction times (ms)														
Difficulty levels	4 years		5-6 years		7-8 years		9-10 years		11-12 years		13-14 years		Adults	
	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
Animate	2399	2981	2396	1803	2085	1130	1758	709	1445	429	1271	653	1353	572
Inanimate	1781	1524	2418	2171	1998	1171	1843	630	1565	575	1433	778	1557	684

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix D.

Descriptive statistics with mean percentages of correct responses, median reaction times, and standard deviations for each difficulty level in the object constancy subtest according to the age-split and three child groups.

		Accuracy data							Median Reaction Times (ms)						
			CP		TDca		TDnv		CP		TDca		TDnv		
			young	old	young	old	young	old	young	old	young	old	young	old	
Outline	Vertical turn	M	60.85	65.89	75.19	84.11	77.13	80.23	2377	1718	2341	1484	2292	1957	
		SD	15.8	21.19	19.03	15.83	21.83	18.99	3393	2249	2493	2611	3192	2136	
	Low front turn	M	88.95	93.6	94.19	97.29	94.57	92.64	1907	2169	1854	1272	2268	1442	
		SD	14.23	11.69	8.82	6.23	10.74	12.76	1990	1745	1243	700	1824	1008	
	Quarter turn	M	88.76	87.98	94.19	97.29	93.8	94.57	2304	1848	1968	1120	2371	1665	
		SD	14.42	14.7	11.43	6.23	12.08	10.74	2230	1257	1312	670	1801	1275	
	Low back turn	M	91.86	94.96	94.19	99.61	90.7	93.8	1562	1656	1588	1021	1665	1411	
		SD	11.13	7.75	8.04	2.54	11.09	12.08	2489	1422	1033	617	1409	1090	
Colored	About turn	M	98.45	99.22	94.57	98.45	86.05	95.35	1958	1899	2357	1199	2287	1459	
		SD	7.10	5.08	12.45	7.1	18.16	11.69	2224	1614	2860	793	3154	2073	
	Vertical turn	M	91.09	92.25	96.12	98.84	89.53	96.51	3261	2455	2680	1452	2576	1651	
		SD	16	14.71	9.51	4.3	16.68	9.31	4764	1872	2052	898	2311	1816	
	Low front turn	M	93.02	93.41	97.67	99.61	94.19	94.96	2590	1886	1922	1199	2767	1539	
		SD	11.63	13.18	6.88	2.54	15.38	12.88	2511	2063	1312	1004	2234	1221	
	Quarter turn	M	86.82	91.09	91.86	96.51	84.11	94.96	3315	2072	2733	1555	2607	1663	
		SD	13.88	17.57	11.71	8.57	17.04	7.75	2997	1585	1720	1055	2460	1096	
	Low back turn	M	93.02	96.51	96.9	98.45	90.7	97.29	1957	1570	1963	939	1963	1392	
		SD	12.72	8.57	7.5	4.9	16.79	8.86	2192	1793	1922	1303	2230	1027	
	About turn	M	94.57	96.12	98.45	99.22	96.9	98.45	2214	1410	1755	1132	1848	1339	
		SD	17.71	13.03	7.1	5.08	9.8	7.1	4084	2006	1582	988	1981	1254	

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix E.

Descriptive statistics with mean percentages of correct responses and standard deviations for each difficulty level in the object decision subtest according to the age-split and three child groups.

		Real Animate		Real Inanimate		Non-Real Animate		Non-Real Inanimate	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	91.57	14.1	95.64	8.13	70.35	18.1	93.6	10.34
	old	90.41	11.19	98.55	4.89	76.45	14.23	93.9	9.2
TDca	young	90.41	15.15	93.6	8.78	83.14	14.14	95.35	8.19
	old	91.57	10.82	95.64	8.58	84.01	16.44	99.13	3.22
TDnv	young	89.83	13.71	93.31	8.34	81.4	14.53	95.64	8.58
	old	92.44	10.96	93.02	12.29	81.4	15.28	94.48	11.35

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

Appendix F.

Descriptive statistics with mean percentages of correct responses and standard deviations for each difficulty level in the object completion subtest according to the age-split and three child groups.

		Accuracy data				Median reaction times (ms)			
		Animate		Inanimate		Animate		Inanimate	
		M	SD	M	SD	M	SD	M	SD
CP	young	85	15.18	83.33	13.19	1986	2240	2123	2136
	old	88.84	13.66	86.51	16.31	1754	1748	1741	1386
TDca	young	90.93	8.95	87.67	9.22	2004	1440	1909	1261
	old	95.81	6.63	93.95	6.95	1521	683	1695	785
TDnv	young	86.74	12.48	85.81	12.58	2172	1361	2057	1098
	old	91.4	11.87	89.77	9.63	1791	922	1712	1028

Note. Bold numbers represent performances reaching the ceiling level (>95% of correct responses).

DISCUSSION GENERALE

DISCUSSION GENERALE

SYNTHÈSE DES RÉSULTATS

L'**étude 1** avait pour objectif de développer une nouvelle batterie de tests (BEVPS) permettant l'évaluation des processus visuo-perceptifs et visuo-spatiaux chez les enfants. Pour ce faire, un échantillon de 179 enfants au développement typique et âgés de 5 à 14 ans a été évalué avec les 15 tests initialement créés. Les 12 tests sélectionnés pour leur sensibilité à l'âge sont organisés en trois facteurs présentant des trajectoires développementales indépendantes. Leur répartition en trois facteurs correspond au traitement des caractéristiques visuelles de base (Facteur 1 – tests de longueur, surface, orientation et position), au traitement de l'objet dont font partie les processus intégratifs et de transformation (Facteur 2 – tests de figures enchevêtrées, figures dégradées, figures hiérarchisées, constance d'objets, décision d'objets et complètement d'objets), et aux processus visuo-spatiaux (Facteur 3 – localisation dans un cadre et évaluation des distances). Les facteurs 1 et 2 correspondent à la distinction entre le traitement des caractéristiques et le traitement de l'objet présentée dans le modèle de reconnaissance visuelle des objets d'Humphreys et Riddoch (1987b, 2006). La majorité de ces tests présentent une bonne voire excellente consistance interne, à l'exception des tests de décision d'objets et de complètement d'objets (facteur 2). Les tests évaluant les processus visuo-perceptifs montrent également une validité convergente significative avec le sous-test Visual Perception du Beery-VMI (Beery et al., 2010) permettant l'évaluation des processus visuo-perceptifs grâce à l'appariement d'un image cible avec une des propositions.

L'**étude 2** avait pour objectif de comparer le développement typique et le développement au sein de la PC de l'analyse distincte des caractéristiques visuelles de base à l'aide de quatre tests de la BEVPS (longueur, surface, orientation et position). Elle avait également pour objectif de déterminer le profil particulier de compétences – déficits présentés par les enfants avec PC. Au sein d'un échantillon d'enfants (n=215, de 5 à 14 ans) et d'adultes (n=20, de 20 à 25 ans) au développement typique, des trajectoires développementales indépendantes ont été mises en évidence pour ces

quatre caractéristiques de base. Le niveau de maturité adulte semble atteint vers 9-10 ans pour l'analyse de la surface, vers 13-14 ans pour l'analyse de la longueur et de la position, alors que le développement se poursuit jusqu'à l'âge adulte pour l'analyse de l'orientation. Cette évaluation a également mis en évidence la présence d'un effet d'oblique au sein des différents groupes d'âge, signifiant que les lignes obliques sont moins bien perçues que les lignes verticales et horizontales.

Les enfants avec PC ($n=86$, de 5 à 14 ans) présentent un déficit global, spécifique et persistant dans le temps de l'analyse des quatre caractéristiques visuelles de base. Cela signifie que les enfants avec PC présentent des performances significativement inférieures aux enfants TDca et TDnv à l'exception du niveau medium de difficulté des tests de longueurs et d'orientation. Pour ce niveau, les enfants avec PC obtiennent des performances inférieures uniquement aux enfants TDca. Un effet d'oblique significatif a également été mis en évidence chez les enfants avec PC. D'un point de vue développemental, les enfants avec PC présentent des trajectoires parallèles à celles des enfants TDca pour les tests de longueur et de surface, alors que ces trajectoires évoluent distinctement pour les tests d'orientation et de position. Les différences présentes entre les trajectoires des deux groupes d'enfants sont significatives à tous les âges. Elles restent stables dans les tests de longueur, surface et position mais augmentent avec l'âge dans le test d'orientation. Enfin, les enfants avec PC âgés de 13-14 ans montrent des résultats équivalents aux enfants TDca de 5-6 ans pour le test d'orientation, alors qu'ils montrent des résultats inférieurs aux enfants de 5-6 ans pour les tests de longueur, surface et position.

L'**étude 3** avait pour objectif de comparer le développement typique et le développement au sein de la PC des processus visuo-perceptifs intégratifs, à savoir la discrimination figure-fond, le groupement perceptif et le traitement local-global à l'aide de trois tests de la BEVPS (respectivement les figures enchevêtrées, les figures dégradées et les figures enchevêtrées). Elle avait également pour objectif de déterminer le profil particulier de compétences – déficits présentés par les enfants avec PC. Au sein d'un échantillon d'enfants ($n=215$, de 5 à 14 ans) et d'adultes ($n=20$, de 20 à 25 ans) au développement typique, des trajectoires développementales indépendantes ont été mises en évidence. Le niveau de maturité adulte semble atteint vers 11-12 ans pour la discrimination figure-fond et pour le traitement local-global, alors que le développement se poursuit jusqu'à l'âge adulte pour le groupement perceptif.

Les enfants avec PC (n=86, de 5 à 14 ans) présentent un déficit global et non spécifique au sein du groupe des plus jeunes enfants (de 5 à 9 ans) et un déficit global et spécifique au sein du groupe des enfants les plus âgés (de 9 à 14 ans). Cela signifie que les enfants avec PC âgés de 5 à 9 ans présentent des performances inférieures aux enfants TDca mais équivalentes aux enfants TDnv au sein des trois tâches à l'exception de certains niveaux de difficulté (dénomination de deux dessins complètement enchevêtrés, dénomination de dessins dégradés sur leurs parties prototypiques ou médianes, et appariement de la partie globale des dessins hiérarchisés). Les enfants avec PC âgés de 9 à 14 ans présentent des performances inférieures aux enfants TDca pour les trois tâches, et inférieures aux enfants TDnv pour les tâches de figures enchevêtrées et des figures dégradées. D'un point de vue développemental, les enfants avec PC présentent des trajectoires développementales distinctes et inférieures aux enfants TDca dès l'âge de 5-6 ans pour les tests de figures dégradées (groupement perceptif) et des figures hiérarchisées (traitement local-global) et dès l'âge de 7-8 ans pour le test des figures enchevêtrées (discrimination figure-fond). Les différences entre les trajectoires sont significatives à tous les âges, elles augmentent avec l'âge pour le groupement perceptif, restent stables pour la discrimination figure-fond et diminuent avec l'âge pour le traitement local-global. Enfin, les enfants avec PC âgés de 13-14 ans montrent des résultats équivalents aux enfants TDca âgés de 7-8 ans pour les tests des figures enchevêtrées et des figures hiérarchisées. Pour le test des figures dégradées, les résultats varient significativement en fonction du type d'item, les enfants avec PC montrent des résultats équivalents aux enfants TDca de 5-6 ans pour les dessins silhouettes alors que les deux groupes d'enfants de même âge montrent des résultats équivalents avec les dessins au trait.

L'**étude 4** avait pour objectif de comparer le développement typique et le développement au sein de la PC des processus de transformation incluant la représentation de l'objet indépendante du point de vue et l'accès aux connaissances structurales de l'objet stockées en mémoire à long terme à l'aide de trois tests de la BEVPS (respectivement la constance d'objets, la décision d'objets et le complètement d'objets). Elle avait également pour objectif de déterminer le profil particulier de compétences – déficits présenté par les enfants avec PC. Au sein d'un échantillon d'enfants (n=215, âges de 5 à 14 ans) et d'adultes (n=20, âges de 20 à 25 ans) au développement typique, des trajectoires développementales indépendantes ont été

mis en évidence. Le niveau de maturité adulte semble atteint vers 9-10 ans pour la représentation de l'objet indépendante du point de vue (constance d'objets). Alors que pour l'accès aux connaissances structurales, ce niveau de maturité semble également atteint vers 9-10 ans au sein de la tâche de complètement d'objets, mais il est largement dépendant du type de dessin proposé (réel – non réel) au sein de la tâche de décision d'objets. Les enfants avec PC ($n=86$, de 5 à 14 ans) présentent un déficit global et non spécifique au sein du groupe des jeunes (5 à 9 ans) et un déficit global et spécifique au sein du groupe des plus âgés (9 à 14 ans). Cela signifie qu'ils présentent des performances inférieures aux enfants TDca et TDnv au sein des trois tâches à l'exception de la reconnaissance des items présentés sans leurs caractéristiques principales pour laquelle les enfants avec PC montrent des performances équivalentes aux enfants TD. D'un point de vue développemental, les enfants avec PC présentent des trajectoires développementales inférieures à celles des enfants de même âge chronologique dès l'âge de 5-6 ans. Ces trajectoires sont parallèles entre les deux groupes d'enfants pour les tests de constance d'objets (images), de décision d'objets et de complètement d'objets alors que ces trajectoires évoluent différemment pour le test de constance d'objets (dessins au trait). Les différences présentes entre les trajectoires des deux groupes d'enfants sont significatives à tous les âges et restent stables avec l'âge. Enfin, les enfants avec PC âgés de 13-14 ans montrent des résultats inférieurs aux enfants au développement typique de 5-6 ans pour le test de décision d'objet et équivalentes aux enfants de 7-8 ans pour les tests de constance d'objets et de complètement d'objets.

LA BEVPS : OUTIL D'ÉVALUATION DES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS, INTÉRÊTS, LIMITES ET UTILISATION CLINIQUE.

Création de la batterie de tests

La création de la batterie BEVPS avait pour premier objectif de permettre une **évaluation spécifique** des différents processus visuo-perceptifs afin de déterminer un profil de compétences-déficits précis et détaillé concernant ces fonctions. Pour ce faire, nous avons inclus différents niveaux de difficulté au sein de chaque test, cela nous permet d'une part d'évaluer des enfants dans un important intervalle d'âge (de 4 à 14 ans) et d'autre part d'affiner le profil clinique au sein de chacun des processus. En effet, cela nous permettrait par exemple, pour un enfant en échec au test de dénomination des figures enchevêtrées (en raison de troubles phonologiques, sémantiques ou de discrimination figure-fond) de lui proposer, en plus de ces items (dessins complètement enchevêtrés), les items au sein desquels les dessins ne sont que partiellement enchevêtrés, ou les dessins se touchent. En fonction des résultats, la tâche d'appariement des figures enchevêtrées n'impliquant que la discrimination figure-fond (Etude 1 p 106) pourrait également être proposée. Cette évaluation complémentaire, en plus des résultats obtenus à la tâche de contrôle de dénomination d'images (processus phonologiques et sémantiques), permettrait de déterminer précisément le type de processus altéré (processus phonologiques, accès sémantique ou discrimination figure-fond). De plus, au sein de certaines tâches, les propositions erronées représentent des types bien spécifiques de distracteurs. Cela nous permet d'analyser le type d'erreur réalisé et les stratégies utilisées par les enfants. Par exemple, au sein des tests de longueur et de surface, une des propositions erronées correspond à l'image cible plus petite selon un pourcentage déterminé par le niveau de difficulté (de 15% à 5%) et l'autre correspond à l'image cible plus grande, selon le même pourcentage. Des résultats préliminaires ont mis en évidence un biais de surestimation de la longueur et de la taille des dessins présentés quel que soit le niveau de difficulté, le groupe d'enfants (développement typique ou paralysie cérébrale) et le groupe d'âge (de 5 à 14 ans). Cela nous fournit donc des pistes supplémentaires pour les adaptations à proposer, surtout concernant les apprentissages scolaires.

Cependant, dans sa **version initiale** (Etude 1 pages 103-114), la batterie de tests comprend certains tests et niveaux de difficulté peu sensibles et donc peu adaptés à certaines tranches d'âge (items dégradés sur la partie prototypique au sein du test des figures dégradées-silhouettes) ou à toutes les tranches d'âge (niveau hard – de 5 à 1% de différence- des tests de longueur et de surface). De plus, elle nécessite un temps de passation très (trop) important devant être réparti sur plusieurs séances d'évaluation, ce qui n'est pas compatible avec la pratique clinique de l'évaluation neuropsychologique. Dans un second temps, un travail de validation de la batterie de tests devra donc être entrepris avec pour objectifs : (1) suppression des niveaux de difficulté peu sensibles, (2) réduction du nombre d'items en sélectionnant les plus pertinents sur base des indices de difficulté, discrimination, fidélité et validité (Laveault & Grégoire, 2004), (3) sélection des règles de départ et d'arrêt pour chacun des tests en fonction de l'âge de l'enfant. En diminuant la taille de la batterie, le temps de passation sera donc significativement réduit pour être réalisée en une séance d'évaluation. Ce travail de validation devra également inclure l'évaluation d'un échantillon supplémentaire d'enfants au développement typique représentatif de l'âge (de 4 à 14 ans par intervalle de 6 mois), du statut socio-économique des parents et du sexe (bien que nos résultats n'aient pas mis en évidence un quelconque effet du genre). En effet, l'échantillon actuel n'étant pas de taille importante, l'intervalle au sein de chaque groupe d'enfants est de deux ans et la répartition des enfants au sein des différents statuts socio-économiques n'a pas été strictement contrôlée lors de leur recrutement.

Le choix du matériel

Nous avons choisi de présenter les différents tests sur un ordinateur portable avec un écran de 17 pouces.

Nous avons choisi un **matériel transportable** afin de nous rendre au domicile de l'enfant avec PC pour les séances d'évaluation. Cela permet d'éviter à l'enfant de nouveaux déplacements jusqu'à l'hôpital (mauvaises expériences antérieures) ou dans un lieu inconnu (avec les appréhensions qui peuvent y être liées). L'enfant est donc rassuré et dans de bonnes dispositions pour les séances. Cela permet également aux parents de devoir encore se déplacer pour des évaluations en plus des différentes séances de prises en charge hebdomadaires de l'enfant. La plupart des parents ont

d'ailleurs profité de ces moments pour s'occuper des autres enfants de la fratrie). Cependant, cette mobilité n'a pas permis d'évaluer les enfants dans un local standardisé. Pour pallier à ce fait, les parents devaient mettre à disposition une pièce calme (avec le moins de distracteurs auditifs et visuels possibles), une chaise adaptée à la taille et la pathologie de l'enfant et une table pour l'installation du matériel. Les parents n'étaient pas présents lors des séances.

La présentation sur **écran** (verticale) nous a été conseillée par des orthoptistes afin de favoriser la prise d'informations visuelles chez les enfants avec troubles oculomoteurs. La présentation à plat sur la table (horizontale) étant souvent considérée comme plus complexe et provoquant une saisie visuelle de moindre qualité.

Toujours dans l'objectif d'utiliser cette batterie avec les enfants avec PC, nous avons choisi de présenter nos items sans **aucune limite de temps** pour de multiples raisons : respecter la vitesse de traitement de l'information propre à chaque enfant, laisser le temps aux enfants avec troubles oculomoteurs de voir et analyser les différents dessins au sein de chaque item ; et de leur laisser le temps, après l'analyse visuelle, de calibrer leur geste pour appuyer sur le contacteur correspondant à leur réponse. Cela entraîne des temps de passation très variables pour un même test, parfois du simple au triple en fonction de l'enfant mais cela permet également l'évaluation des enfants présentant les troubles oculomoteurs et les troubles moteurs les plus sévères qui ne peuvent habituellement pas être testés avec les différentes batteries disponibles sur le marché en raison de leurs limitations et leurs troubles associés.

Après chaque item, nous avons présenté un écran avec une **croix de fixation** centrale pendant 1200ms avec pour objectif premier de garder le regard attiré vers l'écran. Ce délai est long et allonge incontestablement le temps de passation de chaque test, il pourrait être diminué pour l'évaluation des enfants au développement typique. Néanmoins, pour l'évaluation des enfants avec PC, ce long délai permet au logiciel de ne pas prendre en considération les appuis répétés sur le contacteur après la réponse initiale et ne pas fausser les résultats. Chez certains enfants, ces appuis sont dus à de l'impulsivité mais dans la plupart des cas, ils sont dus à leur atteinte motrice (difficulté de gestion du geste, mouvements involontaires).

Concernant la présentation des items, nous avons décidé d'utiliser le **même pattern** au sein de toutes les tâches visuo-perceptives et visuo-spatiales, à l'exception des tests

de figures enchevêtrées et dégradées pour lesquels l'enfant doit dénommer ce qu'il voit apparaître à l'écran et le test de décision d'objets pour lequel l'enfant doit répondre oui si l'objet présenté existe et non si l'objet présenté n'existe pas. Cela permet à l'enfant de mémoriser et d'apprendre ce pattern de présentation et de reproduire la même exploration visuelle au sein de chaque item et espérer ainsi diminuer l'impact des troubles oculomoteurs sur les performances. C'est dans ce même objectif que nous avons choisi de présenter trois possibilités de réponse. Nous n'avons pas choisi un plus grand nombre car cela aurait augmenté le risque de difficultés de prise d'informations visuelles et le nombre de saut de cibles, ni un nombre inférieur car cela aurait situé le seuil du hasard à 50%, ce que nous avons estimé être trop élevé. Enfin, nous avons fait le choix de ne pas utiliser le pattern de présentation « même-différent » car un prétest avec un petit groupe d'enfants avec PC a mis en évidence un biais pour la sélection de la réponse « différent ». Après la passation des tests, les enfants ont, pour la plupart, justifié leur choix en expliquant que si on leur demande de dire si les dessins sont les mêmes ou pas, c'est qu'ils ne le sont pas. De plus, ce type de présentation ne permettait pas l'inclusion de distracteurs spécifiques pour l'analyse des erreurs.

Enfin, nous avons utilisé trois **contacteurs** de diamètre importants (Figure 1, Etude 1, page 101), insérés dans un support antidérapant afin de favoriser l'autonomie de réponse des enfants. Ces contacteurs exigent peu de précision vu leur diamètre et peu de finesse vu leur disposition et leur robustesse. Ils peuvent même être installés sur la tablette de la chaise roulante de l'enfant. Cependant, l'obligation de répondre via les contacteurs ajoute une composante de coordination visuo-motrice pour associer la place de la réponse à l'écran avec la place correspondante des contacteurs. L'utilisation d'une tablette tactile pour appuyer directement sur la réponse aurait été une solution adaptée pour les enfants présentant les atteintes motrices les plus légères. Néanmoins, l'écran tactile n'est pas assez robuste pour résister aux mouvements des enfants présentant les atteintes motrices les plus sévères. Pour ces derniers, cela impliquerait en plus de devoir projeter son bras à distance (distance indispensable pour la perception globale de l'écran) ce qui est difficile en cas de dyskinésie ou spasticité importante. Une alternative intéressante serait d'avoir une tablette tactile avec un écran de grande taille contre laquelle le support avec les contacteurs serait placé. Cela enlèverait l'espace dédié au clavier de l'ordinateur dans

la version actuelle. L'enfant verrait donc la réponse au bas de l'écran de la tablette et juste en contrebas, le contacteur correspondant.

Traitements visuo-perceptifs inclus

Au sein de cette batterie, nous nous sommes focalisés sur les **traitements perceptifs pré-sémantiques**. Les processus sémantiques n'ont donc pas été considérés car nous voulions nous focaliser uniquement sur les processus perceptifs (traitement des caractéristiques, de la forme et de l'objet) avec une implication minimale des processus langagiers tels que la dénomination d'images (accès au nom de l'objet et processus phonologiques) et l'accès aux connaissances sémantiques permettant de catégoriser les objets selon leur identité ou leur fonction.

Au sein du **traitement des caractéristiques**, les quatre tests de la BEVPS permettent l'évaluation distincte de quatre caractéristiques (longueur, surface, orientation et position) et de la présence de l'effet d'oblique. Ils présentent une bonne cohérence interne et une validité convergente avec le test « visual perception » du Beery-VMI (Beery et al., 2010). Cependant, les niveaux hard (1 à 5% de différence) des tests de longueur et surface se sont avérés être trop difficiles pour tous les groupes d'âge et devront donc être supprimés. De plus, cette batterie se focalise actuellement sur les caractéristiques de la forme et ne permet pas l'évaluation d'autres caractéristiques de base de l'objet telles que la couleur, le relief, la texture ou encore le mouvement.

Au sein du traitement de l'objet, les trois **processus intégratifs** sont évalués à l'aide de trois tests distincts présentant chacun une bonne cohérence interne et une validité convergente significative avec le test « visual perception » du Beery-VMI (Beery et al., 2010). Au sein du test de dénomination de figures enchevêtrées, seuls les items pour lesquels les dessins sont complètement enchevêtrés ont été conservés. Les items dont les dessins sont partiellement enchevêtrés ou se touchent n'ont pas été conservés pour les analyses en raison de leur trop grande facilité, tout comme la tâche d'appariement de figures enchevêtrées. Néanmoins, ces items pourront être utilisés pour une analyse individuelle plus fine en cas d'échec à ce test. Au sein du test des figures dégradées, l'évaluation à la fois à l'aide des dessins silhouettes et des dessins au trait et des trois types de dégradation (sur les parties prototypiques, les intersections ou les milieux des segments de formes) est intéressante afin de discriminer les types de groupement perceptif basés sur différents types d'indices perceptifs. Enfin, au sein du test des

figures hiérarchisées, le choix est forcé (l'enfant doit sélectionner la partie locale dans une tâche et la partie globale dans une autre tâche). Néanmoins, cette version du test est relativement facile (effet plafond à partir de 9 ans) et ne permet pas de déterminer si un biais développemental est présent, comme dans les autres études développementales en choix libre telles que celles de Poirel et al. (2011, 2014, 2008).

Au sein des **processus de transformation**, les représentations de l'objet indépendantes du point de vue sont évaluées grâce aux tests de constance d'objets (dessins et images) qui présentent une bonne cohérence interne et une validité convergente significative avec le test « visual perception » du Beery-VMI (Beery et al., 2010). Les neuf orientations des stimuli proposées sur les plans vertical et horizontal ont été regroupées en cinq niveaux. Néanmoins, les analyses ont mis en évidence qu'il est plus pertinent de travailler selon la distinction d'Humphreys et Riddoch (BORB, 1993) : « foreshortened view » qui altère l'axe principal de l'objet, et « minimal features view » qui masque les caractéristiques principales de l'objet. De plus, il faudra sélectionner la position de départ des objets la plus pertinente (sélection de la vue prototypique, la vue de face ou la vue de profil) afin de déterminer plus précisément l'effet de chacune des orientations sur le traitement de l'objet. Les tests de décision d'objet et de complètement d'objet permettent l'évaluation de l'accès aux connaissances structurales stockées en mémoire à long terme et dépendent des processus associatifs permettant de faire le lien entre le percept et les connaissances stockées. Leur cohérence interne est faible, les items doivent donc être retravaillés. Au sein du premier test, des items non réels plus complexes devront être ajoutés, avec une forme globale plus semblable encore à la forme de l'objet réel. De plus, comme dans les études d'Humphreys et Riddoch (2006), il serait intéressant d'inclure des items au sein desquels une caractéristique provenant d'un autre objet est ajouté sur l'objet principal, créant ainsi un autre type de chimères. Au sein du second test, des items plus complexes devront être ajoutés, items pour lesquels les distracteurs devront présenter une meilleure ressemblance morphologique à la réponse. Cependant, il faut également prendre en considération que cette tâche est moins pure en raison de l'implication conjointe des processus de groupement perceptif afin de compléter mentalement la cible avec les propositions et déterminer celle qui manque. De plus, en fonction de la stratégie utilisée par l'enfant, ce test peut également faire intervenir les connaissances sémantiques.

Traitements visuo-perceptifs à inclure

Afin de compléter notre batterie de tests, il semble intéressant de pouvoir inclure des tests permettant l'évaluation des différents **processus sémantiques** (accès aux connaissances stockées de la fonction et de l'appartenance de l'objet à différentes catégories, subordonnée ou super-ordonnante). Deux tests peuvent donc être créés selon le même pattern de présentation, une tâche d'appariement selon la fonction (par exemple, la cible oiseau, les propositions bateau-avion-voiture ; la cible nid, les propositions oiseau-chat-souris ou encore la cible fourchette, les propositions thermomètre-casserole-cuillère) et une tâche d'appariement selon la catégorie (par exemple, la cible chat, les propositions chien-poisson-fleur ; la cible violon, les propositions fauteuil-piano-marteau ou encore la cible dauphin, les propositions bateau-écureuil-baleine). Enfin, l'accès au nom (processus phonologiques) pourrait déjà être évalué à l'aide de la tâche contrôle de dénomination d'images qui sert actuellement au contrôle de la connaissance des images présentées au sein des tâches expérimentales (tests des figures enchevêtrées et des figures dégradées), mais présentées ici de manière prototypique. Pour cette tâche contrôle, les âges d'acquisition des images avaient été contrôlés et seules les images d'objets acquises à l'âge de 5 ans chez plus de 90% des enfants ont été sélectionnées, selon l'étude de Cannard (2006).

Traitements visuo-spatiaux inclus

Deux tâches permettant l'évaluation des processus visuo-spatiaux de localisation (test de localisation dans un cadre avec ou sans quadrillage) et d'évaluation des distances (selon des repères égocentrés ou des repères allocentrés). Ces tests présentent une bonne cohérence interne et l'étude 1 n'a mis en évidence ni effet plancher ni effet plafond au sein des différents groupes d'âge d'enfants TD. Une étude complémentaire chez les enfants TD et les enfants avec PC est donc indispensable pour déterminer, comme pour les études 2, 3 et 4, les trajectoires développementales des deux groupes d'enfants, la globalité – la spécificité et la persistance des déficits chez les enfants avec PC.

LE DÉVELOPPEMENT TYPIQUE DES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS

Niveau de maturité adulte

L'analyse par **niveau de difficulté** (Tableau 1) a mis en évidence que certains tests présentent une maturation simultanée des différents niveaux de difficulté (décision d'objet à 7-8 ans, surface et complètement d'objets à 9-10 ans et orientation à l'âge adulte. Alors que dans la majorité des tests, on observe un développement progressif en fonction des niveaux de difficulté (constance d'objets dessins et image de 5 à 10 ans, figures enchevêtrées de 9 à 12 ans, position de 11 à 14 ans et figures dégradées silhouettes et trait de 9 ans à l'âge adulte). Cela démontre la longueur du processus développemental des processus visuo-perceptifs tout au long de l'enfance, et même jusqu'à l'âge adulte pour les plus complexes d'entre eux.

L'analyse par **niveau de traitement** a mis en évidence une chronologie développementale particulière. Les traitements de l'objet se développent avant les traitements des caractéristiques de base. De plus, au sein des traitements de l'objet, les processus de transformation se développent avant les processus intégratifs. Les processus de transformation se développent en premier lieu. Ils sont basés sur l'analyse de représentations (dessins, images) d'objets de la vie quotidienne et d'animaux, représentations possédant un grand nombre de détails et/ou un point de vue prototypique. Dès leur plus jeune âge, les enfants construiraient donc des représentations des différents points de vue de l'objet associées à sa présentation prototypique et donc des connaissances spécifiques de la forme globale prototypique de chaque des objets en mémoire à long terme, ce qui a également été mis en évidence par (Bezrukikh & Terebova, 2009). Ensuite, les processus intégratifs sont également basés sur l'analyse de représentations d'objets de la vie quotidienne et d'animaux mais dont le percept est incomplet. Les enfants doivent alors reconstruire mentalement ces différentes représentations soit en les complétant en cas de partie manquante ou masquée, soit en les discriminant (les séparer les unes des autres) en cas d'enchevêtrement, soit en les analysant simultanément ou séquentiellement grâce à leur forme globale (morphologie) ou à leurs formes locales (les détails) avant de pouvoir donner un sens et reconnaître ces représentations. Enfin, le traitement des caractéristiques est également basé sur des représentations d'objets, d'animaux ou de

formes géométriques simples mais ces représentations ne varient que sur un composant de base indépendant de l'objet. L'enfant doit donc faire abstraction de l'identité de l'objet et/ou son appartenance à une catégorie et ne doit traiter que le composant de base pertinent (soit sa longueur, soit sa surface, soit son orientation propre, soit sa position dans l'espace). Cette compétence plus abstraite semble donc se développer en dernier lieu.

Sur le plan développemental, seules les études de Pisella et al. (2013), de Palomares et al. (2009) et de Butcher et al. (2012) ont inclus un groupe d'adultes au sein de leur échantillon. Cette démarche a permis de mettre en évidence une progression de l'analyse du composant d'orientation tout au long de l'enfance et jusqu'à l'âge adulte et jusqu'à l'âge de 8 ans pour les composants de longueur et de surface. Concernant l'évaluation du traitement de l'objet (processus intégratifs et de transformation), les seules études ayant évalué ces processus ont utilisé des échantillons d'enfants de faibles intervalles d'âge, de 3 à 6 ans pour Stiers et al. (2002), de 5 à 7 ans pour Bezrukikh et al. (2009) et de 6 à 11 ans pour Bova et al. (2007). Malgré le fait que ces études aient toutes mis en évidence une progression significative des performances avec l'âge et un développement hétérochrone de ces différents processus visuo-perceptifs. Cependant, ces études n'ont pas pu mettre en évidence l'âge auquel les processus évalués sont matures et donc l'ordre dans lequel ces processus visuo-perceptifs se développent chez les enfants.

Tableau 1.
Age auquel chaque processus arrive au niveau de maturité adulte

	Traitement des caractéristiques	Traitement de l'objet	
		Processus intégratifs	Processus de transformation
5-6 ans	/	/	Constance dessins : low front turn Constance images : about turn, vertical turn Constance images : low front turn
7-8 ans	/	/	Décision d'objets : non réels inanimés Constance dessins : quarter turn, low back turn, about turn, vertical turn Constance images: quarter turn, low back turn Complètement d'objets
9-10 ans	Surface easy Surface medium	Figures enchevêtrées : 2 et 3 dessins Figures dégradées au trait : intersection et milieu	
11-12 ans	Position easy	Figures enchevêtrées : 4 dessins Figures dégradées au trait : prototypique Figures dégradées silhouettes : intersection, milieu Figures hiérarchisées	/
13-14 ans	Longueur easy Position hard Position medium Orientation hard Orientation medium Orientation easy	/	/
Adulte		Figures dégradées silhouettes: prototypique	/

Liens avec le modèle hiérarchique d'Humphreys et Riddoch

L'analyse factorielle réalisée au sein de l'étude 1 a mis en évidence que les tests de notre batterie (et donc les processus visuo-perceptifs et visuo-spatiaux sous-jacents) sont répartis au sein de trois facteurs distincts. Le premier facteur comprend les tests permettant l'évaluation du traitement des caractéristiques (longueur, surface, orientation et position). Le deuxième facteur comprend les tests permettant l'évaluation du traitement de l'objet incluant les processus intégratifs et les processus de transformation. Enfin le facteur 3 regroupe les tests permettant l'évaluation des processus visuo-spatiaux. La répartition de nos tests au sein des facteurs 1 et 2 correspond donc aux niveaux de traitements visuo-perceptifs établis au sein du modèle d'Humphreys et Riddoch. Néanmoins, la chronologie développementale mise en évidence au sein de notre travail de thèse ne correspond pas à la hiérarchie définie au sein de leur modèle développé sur base d'étude de cas d'adultes cérébro-lésés. En effet, nous mettons en évidence que les processus de transformation se développent en premier lieu, suivi des processus intégratifs et enfin du traitement des caractéristiques qui se développent en dernier lieu (jusqu'à l'âge adulte pour certains composants). A l'inverse, Humphreys et Riddoch mettent en évidence que le traitement efficace des caractéristiques est un préalable indispensable au traitement de l'objet. Ce traitement étant d'abord réalisé selon des représentations de l'objet dépendantes du point de vue (processus intégratifs) et puis selon des représentations de l'objet indépendantes du point de vue. Ce modèle d'Humphreys et Riddoch est donc utile d'un point de vue développemental pour la définition des processus dépendant des différents niveaux de traitements visuo-perceptifs, processus pouvant ainsi être évalués de manière spécifique. Par contre, l'aspect hiérarchique du modèle ne correspond pas du tout au développement de ces processus, en sens inverse selon l'évaluation à l'aide de la BEVPS.

D'un point de vue développemental, seule l'étude de Bova et al. (2007) a tenté de faire le lien entre les processus visuo-perceptifs évalués au sein de leur échantillon d'enfants et un modèle adulte, le modèle de Marr et Nishihara (1978). L'analyse factorielle réalisée a mis en évidence que la répartition en deux facteurs, le premier comprenant les tâches d'analyse de constance d'objets (représentations de l'objet indépendantes du point de vue) et le second comprenant les tâches de discrimination figure-fond. Cela ne correspondant donc pas à la répartition des processus au sein des différents niveaux de traitements visuo-perceptifs définis au sein du modèle de Marr et Nishihara.

Utilité de la représentation des processus neurovisuels dans le développement typique (Figure 2 p 24).

Cette représentation reprend les différents processus et niveaux de traitement visuo-perceptifs du modèle d'Humphreys et Riddoch mais sans leur aspect hiérarchique qui ne correspond pas au profil développemental. Elle permet de mettre en lien les différents processus relevant des fonctions visuelles supérieures (processus visuo-attentionnels, traitements perceptifs et guidance visuelle du mouvement), ce qui favorise une analyse intégrée des différents processus de sélection, de traitement et d'utilisation des informations visuelles (Chaix & Albaret, 2014). Cette représentation permet également de mettre en relation ces fonctions visuelles supérieures avec les aspects neuro-ophtalmologiques, d'une part les fonctions oculaires (réfraction, axe et statique oculaire) et d'autre part les fonctions neurovisuelles (champs visuels et oculomotricité) (Chokron, 2015; Chokron et al., 2010). Cela permet donc la prise en considération de l'influence de ces processus neuro-ophtalmologiques permettant la saisie des informations visuelles (étape préalable indispensable) sur les processus de sélection, de traitement et d'utilisation de ces informations. Enfin, cette représentation permet de prendre en considération l'influence de l'environnement (limitation des distracteurs) et des aspects psychologiques – physiques (climat de confiance, besoins physiologiques) de l'enfant sur l'évaluation afin de diminuer au maximum ces différents facteurs et ainsi limiter leurs répercussions sur les processus évalués, valable pour l'évaluation de tout processus cognitif (Zuidhoeck, 2015).

Cette représentation descriptive présente donc également un intérêt certain pour l'évaluation clinique des enfants au développement typique et des enfants présentant une pathologie neuro-développementale car elle présente différentes étapes à réaliser lors de l'évaluation afin d'établir un profil de compétences-déficits précis. Elle préconise donc en premier lieu la réalisation d'un bilan neuro-ophtalmologique permettant l'évaluation des capacités de saisie des informations visuelles. En second lieu, elle fournit des pistes pour l'instauration d'un climat propice pour l'évaluation des enfants.

Enfin, elle précise les différents processus devant être évalués sur les plans visuo-attentionnels, perceptifs et de guidance visuelle du mouvement tout en prenant en considération les répercussions d'un trouble neuro-ophtalmologique sur les processus cognitifs et les répercussions d'un processus déficitaire sur le fonctionnement des autres processus.

Nous la nommons « représentation » et pas modèle, car à l'heure actuelle, sa prétention est descriptive et non pas explicative de l'influence des différents niveaux de traitements les uns sur les autres. Un travail plus approfondi par processus avec des enfants présentant différents types de troubles neuro-développementaux serait nécessaire afin de définir les relations exactes entre les différents niveaux et les variables expliquant ces relations.

AU SEIN DE LA PARALYSIE CÉRÉBRALE,

Déficit global ou sélectif en comparaison avec les enfants TDca?

Les études 2, 3 et 4 ont permis la mise en évidence d'une atteinte globale de tous les processus visuo-perceptifs évalués au sein des trois niveaux de traitement, atteinte plus marquée chez les enfants plus âgés (9 à 14 ans) que chez les jeunes (5 à 9 ans) en termes de nombre de niveaux de difficulté déficitaires au sein de chaque test.

Déficit spécifique ou non en comparaison avec les enfants TDnv?

Des déficits spécifiques (performances inférieures à celles des enfants TDnv) ont été mis en évidence au sein des trois niveaux de traitement mais pas au sein de tous les processus. Au sein du traitement des caractéristiques, l'analyse des composants de taille, orientation et position sont déficitaires au sein des deux groupes d'âge. Au sein du traitement de l'objet et plus particulièrement des processus intégratifs, la discrimination figure-fond est déficitaire chez les enfants plus âgés (9-14 ans) et le groupement perceptif est déficitaire au sein des deux groupes d'âge. Enfin, au sein des processus de transformation, les représentations indépendantes du point de vue et l'accès aux connaissances structurales stockées en mémoire sont déficitaires chez les enfants des deux groupes d'âge. Seuls l'analyse du composant de longueur et du traitement local-global ne montrent des performances déficitaires qu'en comparaison avec les enfants TDca.

Trajectoires développementales

L'analyse des trajectoires développementales a mis en évidence la présence de différents types de courbes et donc différents types de retard du développement de ces processus visuo-perceptifs.

En premier lieu, nous observons un retard stable et persistant significatif dès l'âge de 5 ans pour l'analyse des composants de base de longueur et de surface et pour les processus de transformation (représentations indépendantes du point de vue et accès aux connaissances structurales stockées) et dès l'âge de 7 ans pour la discrimination figure-fond.

En second lieu, nous observons un retard présent dès l'âge de 5 ans qui s'intensifie avec l'âge pour l'analyse des composantes de base d'orientation et de surface et pour

le groupement perceptif. A l'inverse, nous observons également un retard présent dès l'âge de 5 ans mais qui diminue avec l'âge pour la discrimination figure-fond.

Equivalences des performances des enfants avec PC de 13-14 ans

Pour les tests de longueur, taille, position et de décision d'objets, les performances des enfants avec PC sont inférieures aux performances des enfants TD de 5-6 ans. Pour les tests d'orientation et de figures dégradées silhouettes, les performances des enfants avec PC sont équivalentes à celles des enfants TD de 5-6 ans. Pour les tests des figures enchevêtrées, des figures hiérarchisées, de constance d'objets (dessins et images) et de complètement d'objets, les performances des enfants avec PC sont équivalentes à celles des enfants TD de 7-8 ans. Enfin, pour le test des figures dégradées au trait, les performances des enfants avec PC ne présentent aucun retard et sont équivalentes à celles des enfants TD de même âge chronologique.

Les enfants avec CP les plus âgés de notre échantillon présentent donc un retard d'environ 8 ans pour le traitement des caractéristiques et de 6 à 8 ans pour les processus intégratifs et de transformation.

En résumé, nos études ont mis en évidence des déficits globaux et spécifiques chez les enfants avec PC, présents au sein des différents groupes d'âge, sauf quelques exceptions. De nombreuses études (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2004, 2007, 2009, 2012; Menken et al., 1987; Pagliano et al., 2007; van den Hout et al., 2004) avaient déjà mis en évidence des déficits visuo-perceptifs chez les enfants avec PC mais elles n'ont pas évalué l'ensemble des processus au sein d'un même échantillon d'enfants. Notre méthodologie a donc permis de confirmer que tous les processus visuo-perceptifs sont susceptibles d'être atteints au sein de la paralysie cérébrale. Cependant, seule l'étude de Stiers et al. (2002) évalue la spécificité des troubles visuo-perceptifs en comparant les performances des enfants avec PC et les performances d'enfants de même niveau de raisonnement non verbal. Elle met en évidence une différence significative entre le nombre de processus atteints en comparaison avec les enfants TDca et le nombre de processus atteints en comparaison avec les enfants TDnv. Elle met également en évidence un plus petit nombre de processus atteints par enfant avec CP quand les performances sont

comparées aux enfants TDnv. Notre étude, quant à elle, ne met pas en évidence de différence significative concernant le nombre de processus atteints. Seuls le composant de base de longueur et le traitement local-global ne sont pas déficitaires en comparaison avec les enfants TDnv. Nous pourrions par ailleurs compléter nos analyses en calculant d'une part le nombre de processus atteints par enfant et le nombre de niveaux de difficulté atteints par enfant en fonction du point de comparaison. Enfin, ce travail de thèse a été le premier à tenter de définir et quantifier le type de retard présenté par les enfants avec PC de différents groupes d'âge.

Vers un profil plus précis ?

D'un point de vue clinique, ce profil global et spécifique devra être nuancé par l'analyse, pour chaque enfant, des différents niveaux de difficultés présentés dans chaque test afin de déterminer le profil de compétences-déficits nécessaire à toute proposition d'adaptations et de prises en charge. L'analyse des profils individuels semble également indispensable d'une part en raison de l'hétérogénéité des caractéristiques médicales et des troubles associés présents dans la paralysie cérébrale et d'autre part par la variabilité inter-individuelle très importante des performances visuo-perceptives mise en évidence lors des différentes études (Fazzi et al., 2004, 2012; Pagliano et al., 2007; Stiers et al., 2001). De plus, compte tenu de l'influence des processus visuo-perceptifs sur les autres fonctions visuelles supérieures et de leur déficit potentiellement global chez les enfants avec PC, l'évaluation de ces fonctions est indispensable lors de tout bilan neuropsychologique.

Notre analyse des résultats en comparaison avec les performances des enfants TDnv, bien que fonctionnant au niveau du groupe et non pas au niveau individuel, a toutefois permis de mettre en évidence les niveaux de difficultés préservés au sein de chacun des tests. Ces niveaux préservés constituent la base du travail avec les enfants avec PC. Au sein du traitement des caractéristiques, seuls quelques niveaux au sein de l'orientation et de position sont préservés. Cela signifie que le travail de ces caractéristiques doit se faire avec du matériel présentant des différences perceptives significativement supérieures à celles utilisées au sein de la BEVPS, à partir de 20-25% pour la longueur et la taille et 20 à 25° pour l'orientation et la position par exemple. Au sein du traitement de l'objet, et plus particulièrement des processus intégratifs, la discrimination figure-fond est altérée dès l'enchevêtrement de quatre dessins, le travail

pourra donc se baser sur la reconnaissance des figures présentant deux ou trois dessins. Ensuite, au sein du groupement perceptif, tous les niveaux impliquant des dessins silhouettes sont déficitaires à l'inverse des dessins au trait. Le travail du groupement perceptif pourra donc débuter avec ces dessins au trait présentant différents types de dégradation. Le traitement local-global ne présentant pas de déficit spécifique pourra donc être utilisé en support pour le travail des processus visuo-perceptifs. Enfin, au sein des processus de transformation, la constance d'objets est altérée quand les dessins au trait sont présentés avec une modification significative de l'axe principal de l'objet. De ce fait, l'utilisation d'images en couleurs et de dessins masquant les caractéristiques principales permettra donc le travail des représentations de l'objet indépendantes du point de vue. L'accès aux connaissances structurales des objets stockées en mémoire est déficitaire, plus marqué pour les items animés que pour les items non animés. Le travail de cet accès pour le traitement des items non réels pourra débuter par l'analyse systématique des niveaux locaux et globaux de chacun d'eux afin de faire prendre conscience à l'enfant de l'incongruité de la présence simultanée de certaines caractéristiques au sein d'un même objet.

INFLUENCE DES DIFFÉRENTES CARACTÉRISTIQUES SUR LES PROCESSUS VISUO-PERCEPTIFS

Considérant les différents troubles associés à la paralysie cérébrale et les différentes caractéristiques inhérentes à la PC (trouble moteur et lésions cérébrales par exemple), il n'existe pas, à notre connaissance, d'étude systématique sur les liens entre les troubles associés (troubles neuro-ophtalmologiques, prématurité, petit poids de naissance, épilepsie), les caractéristiques médicales et les troubles visuo-perceptifs observés au sein de cette pathologie. Seule l'étude de Fazzi et al. (2012) définit le profil neuro-ophtalmologique au sein de chaque type d'atteinte motrice (hémiplégie, diplégie et tétraplégie). Néanmoins, cette étude n'inclut pas les différents processus visuo-perceptifs au sein de ces profils. Nous avons donc réalisé une étude exploratoire avec l'échantillon d'enfants décrit dans les études 2, 3 et 4 de cette thèse. Le premier objectif de cette étude est de caractériser cet échantillon d'enfants avec PC. Le second objectif est de déterminer les relations qui existent entre les troubles associés, les caractéristiques médicales et les différents processus visuo-perceptifs dépendant des trois niveaux de traitement (traitement des caractéristiques, traitement de l'objet [processus intégratifs et processus de transformation]). Enfin, le dernier objectif est de déterminer si le nombre cumulé de troubles associés a une influence négative sur ces processus visuo-perceptifs.

Caractérisation de notre échantillon

Nous avons réalisé des analyses de χ^2 (Statistica 13) avec un seuil de significativité de 5%, afin de déterminer si les troubles et les caractéristiques sont distribués de manière égale au sein de notre échantillon (tableau 2).

Tableau 2.

Valeurs du χ^2 et différences de distribution pour les troubles et caractéristiques de l'échantillon d'enfants avec PC.

	valeurs χ^2	DI	p	Différences distribution
Epilepsie	9.18	3	.03	Avec < sans
Naissance: terme vs. prématurité	10.64	3	.01	Terme < prématurité
Naissance: terme vs. prématurité vs. prématurité sévère vs. prématurité extrême	22.86	9	.006	Sévère = extrême < terme = prématurité
Poids de naissance	13.69	3	.003	Poids normal < petit poids
Strabisme	8.42	3	.04	Avec < sans
Troubles de la réfraction	0.34	3	.95	/
Troubles neurovisuels (champs visuels)	2.21	3	.53	/
Troubles oculomoteurs	13.65	3	.003	Avec = sans
GMFCS	49.19	9	< .001	Niveaux 2, 3, 4 < niveau 1
Lésions cérébrales	6.01	9	.91	/

Note. GMFCS = global motor functional classification scale.

Au sein de notre échantillon, la fréquence des troubles de la réfraction et des troubles neurovisuels (champs visuels) ne diffère pas au sein des quatre types d'atteinte motrice (diplégie, hémiplegie gauche et droite, quadriplégie), variant respectivement entre 39 et 47% et entre 5 et 20%. Néanmoins, ces fréquences montrent une variabilité importante au sein des différentes études sur la PC (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2012; Kozeis et al., 2007; Stiers et al., 2002). Ces différences peuvent cependant être dues à l'échantillon d'enfants sélectionnés en raison de l'hétérogénéité liée à cette pathologie et liées au type (sélection des tests utilisés) et à la précision (collaboration des enfants et prise en considération des troubles associés) des examens neuro-ophtalmologiques réalisés avec ces enfants avec PC.

L'analyse par type d'atteinte motrice a permis la mise en évidence de profils particuliers. Les enfants avec diplégie montrent une prévalence élevée de prématurité sévère (29 à 32 semaines d'âge gestationnel), mais une faible prévalence d'épilepsie et de poids de naissance normal (>2500g), ce profil étant semblable à celui établi au sein des études de Fazzi et al. (2012) et de Stiers et al. (2002). Les enfants avec hémiplegie gauche montrent une prévalence élevée de naissance à terme (>36 semaines d'âge gestationnel), de poids de naissance normal (>2500g) et de niveau 1 au GMFCS (marche autonome sans difficulté significative), mais une prévalence faible de naissance prématurée sévère (29 à 32 semaines d'âge gestationnel) et de strabisme. Ce profil de naissance à terme et de marche autonome a également été mis en évidence dans d'autres études (Fazzi et al., 2012; Palisano et al., 2007; Stiers et al., 2002) mais celles-ci ne distinguaient pas la latéralisation gauche-droite de l'hémiplegie. Concernant plus précisément le strabisme, les autres études (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2012; Kozeis et al., 2007; Stiers et al., 2002) ne mettent en évidence aucune différence dans sa prévalence au sein des différents types d'atteinte motrice, variant de 35 à 70% pour l'hémiplegie, de 30 à 88% pour la diplégie et de 35 à 68% pour la quadriplégie. Enfin les enfants avec quadriplégie montrent une prévalence élevée de troubles oculomoteurs et de niveaux 3-4 au GMFCS (déplacements en cadre de marche ou chaise roulante auto-propulsée), mais une faible prévalence de niveau 1 au GMFCS (marche autonome). Ce profil est également mis en évidence au sein des études de Fazzi et al. (2012) et de Palisano et al. (2007). Il faut toutefois noter que les troubles oculomoteurs sont tout de même mis en évidence dans plus de la moitié des cas au sein des autres types d'atteinte motrice.

Influence des troubles associés et des caractéristiques médicales sur les processus visuo-perceptifs

Afin de déterminer les troubles et caractéristiques pouvant présenter une influence significative sur les processus visuo-perceptifs, nous avons réalisé des analyses « rapport de vraisemblance » (logiciel R) sur le nombre total de réponses correctes à chaque test. L'ensemble des résultats est présenté au sein du tableau 3.

En premier lieu, le type d'atteinte motrice a une influence significative sur le traitement des caractéristiques de base (tests de surface et orientation) et sur les processus intégratifs dont font partie le groupement perceptif (test des figures dégradées – dessins silhouettes) et le traitement local-global (test des figures hiérarchisées). Néanmoins, le type d'atteinte motrice n'a aucune influence sur les processus de transformation (représentations de l'objet indépendantes du point de vue et accès aux connaissances structurales stockées en mémoire). Contrairement à nos résultats, Stiers et al. (2002) ne montre aucun lien entre le type d'atteinte motrice et les différents processus visuo-perceptifs dépendant du traitement de l'objet tant pour le nombre de processus déficitaires que pour les performances obtenues aux différents tests de la L94 (Stiers et al., 1999).

En deuxième lieu, la présence de troubles de la réfraction a une influence négative significative sur certains processus des différents niveaux de traitement visuo-perceptifs : le traitement du composant de base de position, le groupement perceptif, le traitement local-global et l'accès aux connaissances structurales stockées en mémoire. Contrairement à nos résultats, Haard, Aring, & Hellström (2004) ne montrent aucun lien entre les troubles de la réfraction et les troubles visuo-perceptifs. D'autres études montrent une incidence significativement supérieure des troubles de la réfraction chez les enfants avec PC (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2007, 2012; Kozeis et al., 2007; Sobrado et al., 1999; Stiers et al., 2002). Néanmoins, aucune de ces études n'a tenté de faire le lien entre les troubles de la réfraction et les troubles visuo-perceptifs.

Toujours au sein des troubles ophtalmologiques, le strabisme a une influence négative significative sur les différents niveaux de traitement visuo-perceptif (traitement des caractéristiques, processus intégratifs, processus de transformation). Cette influence

négative globale du strabisme a déjà été mise en évidence dans plusieurs études (Barca, Cappelli, et al., 2010; Fazzi et al., 2004; Pagliano et al., 2007).

En troisième lieu, la prématurité (naissance avant 37 semaines d'âge gestationnel) et le petit poids de naissance (inférieur à 2500g) ont une influence négative significative sur les processus visuo-perceptifs mais de différentes manières. Au sein du traitement des caractéristiques, un petit poids de naissance influence l'analyse de la surface alors la prématurité influence l'analyse de la position. Au sein des processus intégratifs, la prématurité ne montre aucune influence alors que le petit poids de naissance impacte le groupement perceptif et le traitement local-global. Enfin au sein des processus de transformation, le petit poids de naissance ne montre pas d'influence alors que la prématurité impacte à la fois les représentations de l'objet indépendantes du point de vue et l'accès aux connaissances structurales. Les enfants nés prématurément avec un petit poids de naissance peuvent donc présenter des déficits au sein des différents processus visuo-perceptifs.

Tableau 3.

Valeurs statistiques et effet des différents troubles et caractéristiques médicales sur les performances aux différents tests

	Atteinte motrice	Troubles réfraction	Strabisme	Prématurité	Poids de naissance	Épilepsie
Longueur	$p > .05$	$p > .05$	$G^2=6.67, p=.01$ Abs>prés	$p > .05$	$p > .05$	$p > .05$
Surface	$G^2=15.76, p=.001$ HD > autres	$p > .05$	$G^2=31.26, p<.001$ Abs>prés	$p > .05$	$G^2=9.08, p=.003$ normal>petit	$G^2=5.72, p=.02$ Abs>prés
Orientation	$G^2=17.18, p<.001$ HD> autres	$p > .05$	$G^2=10.99, p<.001$ Abs>prés	$p > .05$	$p > .05$	$p > .05$
Position	$p > .05$	$G^2=4.37, p=.04$ Abs>prés	$G^2=6.37, p=.01$ Abs>prés	$G^2=22.07, p<.001$ terme>préma	$p > .05$	$p > .05$
Figures enchevêtrées	$p > .05$	$p > .05$	$G^2=6.67, p=.01$ Abs>prés	$p > .05$	$p > .05$	$p > .05$
Figures dégradées-silhouettes	$G^2=40.87, p<.001$ D>HD>Q, HG	$G^2=7.08, p=.008$ Abs>prés	$G^2=5.52, p=.02$ Abs>prés	$p > .05$	$G^2=22.61, p<.001$ normal>petit	$p > .05$
Figures dégradées-traits	$p > .05$	$G^2=13.45, p<.001$ Abs>prés	$G^2=5.85, p=.02$ Abs>prés	$p > .05$	$p > .05$	$p > .05$
Figures hiérarchisées	$G^2=7.92, p=.05$ Q>HG	$p > .05$	$G^2=34.53, p<.001$ Abs>prés	$p > .05$	$G^2=6.91, p=.009$ normal>petit	$p > .05$
Constance objets-dessins	$p > .05$	$p > .05$	$p > .05$	$G^2=3.67, p=.05$ terme>préma	$p > .05$	$p > .05$
Constance objets-images	$p > .05$	$p > .05$	$G^2=4.53, p=.03$ Abs>prés	$G^2=4.28, p=.04$ terme>préma	$p > .05$	$p > .05$
Décision objets	$p > .05$	$G^2=6.62, p=.01$ Abs>prés	$p > .05$	$p > .05$	$p > .05$	$p > .05$
Complètement objets	$p > .05$	$p > .05$	$G^2=4.95, p=.01$ Abs>prés	$G^2=4.33, p=.04$ terme>préma	$p > .05$	$p > .05$

Note. HD = hémiplegie droite, HG = hémiplegie gauche, D = diplégie, Q = quadriplégie. Abs>prés = performances quand le trouble est absent sont supérieures aux performances quand le trouble est présent.

Pagliano et al. (2007) et van den Hout et al. (2004) ont également montré une influence négative de la prématurité sur les processus intégratifs et les processus de transformation. À l'inverse, Stiers et al. (2002) n'ont mis en évidence aucune différence entre les performances des enfants avec PC nés à terme ou nés prématurément.

En dernier lieu, l'épilepsie ne montre une influence négative significative que sur l'analyse du composant de base de taille. Ce résultat peut donc être en accord avec les études (Fazzi et al., 2012; Ortibus et al., 2009; Stiers et al., 2002) qui ne montrent aucun effet de l'épilepsie sur les processus visuo-perceptifs alors que son influence délétère sur l'efficacité intellectuelle est reconnue (Carlsson et al., 2003; Wallace, 2001).

L'effet du cumul des troubles associés sur les processus visuo-perceptifs

Afin de déterminer l'effet du cumul des troubles associés (prématurité, petit poids de naissance, strabisme, troubles de la réfraction, troubles oculomoteurs), nous avons réalisé des analyses statistiques non paramétriques de Kruskal-Wallis (Statistica 13) avec un niveau de significativité de 5% sur le pourcentage de réponses correctes à chaque test par niveau de traitement.

Au sein du **traitement des caractéristiques** (Figure 1a), plus les enfants cumulent des troubles associés, plus les performances de traitement de la surface, $H(5,79)=12.79$, $p = .02$, de l'orientation, $H(5,79)= 12.82$, $p = .02$, et de la position, $H(5,79)= 15.66$, $p = .008$, diminuent. Le cumul n'influence pas le traitement de longueur, $H(5,79)= 8.19$, $p = .14$.

Au sein du **traitement de l'objet** (processus intégratifs et processus de transformation, Figure 1 b et c), le cumul des troubles ne montre aucun effet négatif significatif sur les performances ($ps > .15$), bien qu'une légère tendance soit présente pour le groupement perceptif (test des figures dégradées – dessins au trait), $H(5,79)= 9.55$, $p = .09$ et pour l'accès aux connaissances structurales (tests de décision d'objets et de complètement d'objets), respectivement $H(5,79)=9.7$, $p = .08$ et $H(5,79)= 9.9$, $p = .08$.

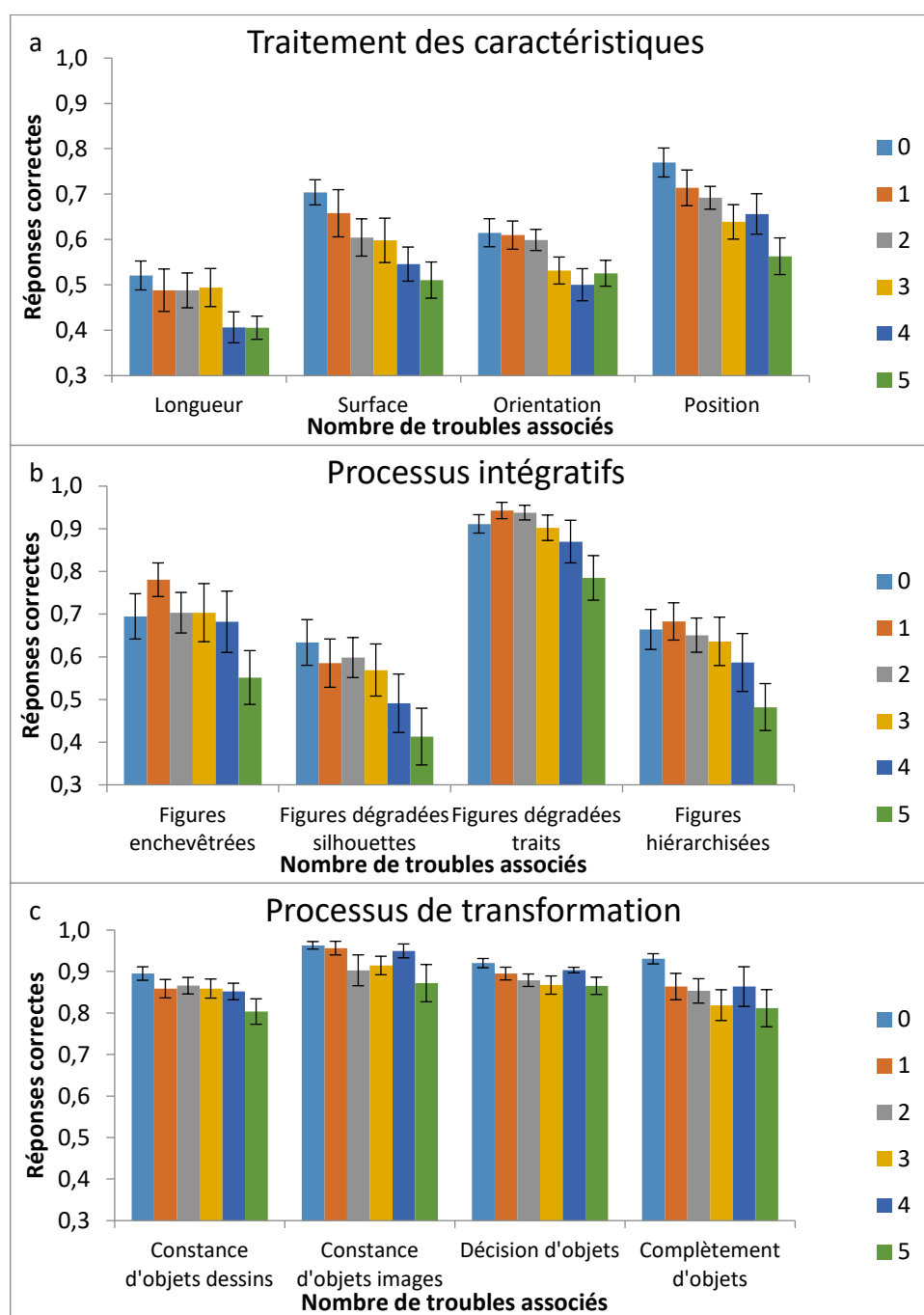


Figure 1. Représentation de l'effet du cumul sur (a) le traitement des caractéristiques, (b) les processus intégratifs et (c) les processus de transformations.

Néanmoins, ces résultats restent à relativiser au vu du faible nombre d'enfants au sein de chaque catégorie de cumul (entre 11 et 16), il persiste en effet une importante variabilité au sein des performances des enfants, ce qui rend ces résultats peu précis et les analyses peu puissantes.

Discussion

Cette étude a mis en évidence des profils spécifiques de troubles associés et de caractéristiques médicales au sein de notre échantillon en fonction du type d'atteinte motrice présentée par l'enfant avec PC. Elle a également mis en évidence l'influence négative significative du strabisme, des troubles de la réfraction, de la prématurité et du petit poids de naissance sur les processus visuo-perceptifs, mais seulement une influence limitée du cumul de ces troubles associés. Ces données nous permettent donc d'affiner un peu le profil de ces enfants et propose des pistes pour de futures recherches avec un échantillon de taille beaucoup plus conséquente.

IMPLICATIONS CLINIQUES

Profil de compétences et déficits

Ce travail de thèse a mis en évidence l'importance de systématiser l'évaluation conjointe des troubles ophtalmologiques (troubles de la réfraction, strabisme, nystagmus, amblyopie), des troubles neurovisuels (amputation des champs visuels et troubles oculomoteurs) et des troubles visuo-perceptifs à l'aide de tests spécifiques pour chacun des processus évalués. L'utilisation de tels tests permet de cibler plus précisément les processus préservés et les processus déficitaires, le risque de confusion, d'erreurs avec un processus visuo-perceptif d'un autre niveau de traitement ou avec un autre processus cognitif est donc moindre.

Cette évaluation conjointe permet donc l'élaboration d'un profil de compétences et de déficits précis pour chaque enfant, profil sur lequel le neuropsychologue pourra s'appuyer pour poursuivre l'évaluation des autres fonctions cognitives en adaptant la passation en fonction des troubles déjà mis en évidence et obtenir ainsi une représentation détaillée et fiable du fonctionnement intellectuel et cognitif de cet enfant. Ce profil « compétences-déficits » est basé à la fois sur les informations quantitatives (résultats aux différents tests, comparés aux normes) et sur les informations qualitatives (ensemble des observations réalisées tout au long des interactions avec l'enfant). Il est également complété par l'ensemble des informations récoltées lors de l'anamnèse (antécédents médicaux, troubles associés, aspects développementaux, réalisation des activités de la vie quotidienne et apprentissages scolaires). Différents questionnaires peuvent par exemple être utilisés pour faire le lien entre des situations problématiques de la vie quotidienne et des troubles neurovisuels (amputations du champ visuel, troubles oculomoteurs, troubles de la cognition visuelle) sous-jacents (Dutton, 2015; Ortibus et al., 2011; Salavati et al., 2017).

Ce profil devra ensuite être précisément et clairement expliqué à l'enfant, à ses parents et à tous les intervenants gravitant autour de l'enfant. Une séance d'information pourra également être proposée aux enfants de la classe, pour expliquer avec des mots simples et des exemples concrets comment leur copain « voit et perçoit », par exemple en leur faisant porter des lunettes simulant une amputation des champs visuels ou un jeu de suivi de cibles simulant un trouble de la fixation. Etant dans un contexte développemental, l'enfant avec de tels troubles n'a jamais expérimenté de voir et

percevoir « normalement », il ne peut donc pas s'imaginer qu'il existe une autre manière de voir et donc ne se plaint pas de « ne pas bien voir ». A l'inverse, le parent, ne présentant pas de tels troubles, éprouve souvent des difficultés pour comprendre le comportement de son enfant tant sur le plan des activités que des interactions sociales. Par exemple, un enfant avec une amputation des champs visuels (hémianopsie homonyme latérale gauche par exemple) ne verra que la moitié droite du champ visuel quand il regarde droit devant lui, il ne peut donc pas d'un seul regard se construire une représentation complète de l'environnement qui l'entoure ou du tableau en classe). Il devra impérativement déplacer son regard de gauche à droite et de droite à gauche à de nombreuses reprises afin de se créer une représentation mentale complète stockée en mémoire. Sinon, il peut agir comme si cet héli-champ gauche n'existe pas, ce qui provoque de nombreuses chutes sur les objets présents au sol ou encore la non prise en considération des personnes présentes (mais qui n'interagissent pas avec lui en parlant) ou de chaque page de gauche d'un livre. Un enfant avec trouble de la fixation ne va donc pas pouvoir maintenir son regard sur sa feuille d'exercices ni sur le tableau mais il ne pourra pas non plus maintenir son regard sur la personne qui est en train de lui parler, et donc de regarder cette personne dans les yeux, ce qui peut induire de fausses interprétations (troubles attentionnels voire troubles relationnels). Enfin, un enfant présentant un trouble au niveau du groupement perceptif (capacité à former mentalement une représentation complète de l'objet présenté de manière fragmentée ou incomplète) va être en difficulté pour le traitement et donc la reconnaissance des objets (ou leurs représentations imagées) qui ne sont pas entièrement visibles. Cet enfant peut donc répondre ne pas voir un objet présent juste devant lui si celui-ci est en partie masqué par un autre objet (par exemple : une télécommande cachée en partie derrière un coussin dans le fauteuil ou une vache dessinée mais masquée en partie derrière le dessin de la clôture de la prairie), en fonction des capacités d'imagerie mentale sur lesquelles l'enfant peut se baser.

Des adaptations pourront donc être proposées pour pallier aux déficits observés, adaptation évidemment basées sur les compétences des enfants. Elles auront pour objectif d'aider l'enfant dans ses activités de la vie quotidienne et de favoriser son autonomie (organisation des armoires, garde-robes et réfrigérateur à l'aide de pictogrammes, selon un principe de simplification des informations visuelles et de constance dans le temps, c'est-à-dire les objets rangés à la même place et présentés

de la même manière). Elles seront également proposées dans le cadre scolaire, d'une part pour la réalisation des activités de la vie de classe afin de ne pas en exclure l'enfant (par exemple : responsable de la distribution et du ramassage de feuilles, chef de rang, ou encore transport des boîtes à tartines,...) et d'autre part pour toutes les activités pédagogiques et sportives. Pour ce faire, une collaboration étroite et bienveillante entre le neuropsychologue, l'enfant, les parents et l'équipe éducative (enseignants, direction et centre PMS) semble nécessaire. Les adaptations proposées doivent être comprises et réalisables en situation de classe, elles doivent également répondre aux difficultés et interrogations concrètes des enseignants afin de favoriser leur utilisation dans les différents apprentissages (position de l'enfant dans la classe, disponibilité visuelle des différents référentiels affichés en classe, utilisation de codes couleurs, manipulation active du matériel et intégration multi-sensorielle,...).

Enfin une prise en charge spécifique pourrait être débutée en parallèle de la mise en place des adaptations dans les différents lieux de vie de l'enfant. Celle-ci aurait pour objectif de travailler les différents processus déficitaires, en se basant toujours sur les compétences de l'enfant, dans un ordre prédéfini : les processus de prise d'informations visuelles (champs visuels et oculomotricité), de sélection des informations visuelles pertinentes (processus visuo-attentionnels), de traitement de ces informations (traitements perceptifs et puis spatiaux) et enfin l'utilisation de ces informations pour agir sur le monde environnant (coordination visuo-motrice et traitements visuo-constructifs). Ce travail serait évidemment réalisé en lien avec les besoins relevés dans la vie quotidienne et les apprentissages scolaires, avec du matériel ludique et écologique afin de faciliter le transfert et la généralisation des acquis.

Quid des autres processus dépendant des fonctions visuelles supérieures ?

L'évaluation conjointe des troubles neuro-ophtalmologiques et visuo-perceptifs devrait également inclure les autres processus dépendant des fonctions visuelles supérieures telles que définies au sein de la Figure 2 (page 24). Concernant tout d'abord l'évaluation des processus visuo-attentionnels, différentes tâches de barrage sont disponibles sur le marché : attention visuelle NEPSY (Korkman et al., 2003), attention

sustained LEITER 3 (Roid et al., 2013), barrages WPPSI IV et WISC V (Wechsler, 2016; Wechsler, 2014), barrages EVA (Chokron, 2015). Elles ont pour but l'évaluation des capacités d'attention sélective visuelle (discrimination d'une image cible parmi des distracteurs de morphologie plus ou moins proche) et d'exploration visuelle (prise en considération de toutes les parties de l'espace page, omission ou passage à plusieurs reprises à certains endroits). Cependant, l'analyse qualitative de ces tâches peut également nous fournir des informations sur les stratégies du regard employées par l'enfant (saccades oculaires avec ou sans saut de cible, balayage linéaire avec retour à la ligne, qualité du balayage en début- milieu et fin de page, balayage aléatoire, décrochages du regard).

Concernant ensuite l'évaluation des processus visuo-spatiaux, les tests de localisation dans un cadre (avec ou sans grille) et d'évaluation des distances (sur base de repères égocentrés ou allocentrés) de la BEVPS (étude 1 pages 111-113) pourraient être utilisés. Deux tâches de rotations mentales (dessins au trait et images en couleurs) ont également été créées (mais non présentées au sein de ce travail de thèse) selon les mêmes principes de présentation que les autres tests de la BEVPS et pourraient être utilisées d'une part pour évaluer ces capacités de rotation mentale mais également les capacités de perception des symétries verticales (gauche-droite) et horizontales (haut-bas) présentées comme distracteurs au sein de chacun des items. D'autres tâches sont également disponibles sur le marché. Par exemple, les capacités de rotation mentale peuvent être évaluées à l'aide du test « position in space » du DTVP2 (Hammil et al., 1993) ou « figure rotation » de la LEITER-R (Roid & Miller, 1997). Le test « puzzles géométriques » de la NEPSY 2 (Korkman et al., 2012) permet, selon le manuel, l'évaluation des capacités de rotation mentale et d'analyse visuo-spatiale, mais il requiert en réalité de la part de l'enfant un traitement de l'objet (reconnaissance/appariement de la forme cible avec une des formes réponses), un rotation mentale (pour orienter les deux formes dans le même sens) et une localisation dans un cadre. Il sera donc plus difficile avec ce type de tâche, de déterminer en cas d'échec, le processus réellement déficitaire.

Concernant l'évaluation de l'intégration visuo-motrice, deux tests sont disponibles sur le marché : « précision visuo-motrice » de la NEPSY 2 (Korkman et al., 2012) et « Eye-hand coordination » du DTVP 3 (Hammil et al., 2013) pour lesquels l'enfant doit réaliser un tracé le plus précis possible entre des guides visuels, de complexité croissante.

Cependant, la coordination visuo-motrice peut également être évaluée de manière qualitative en demandant à l'enfant d'atteindre et d'attraper un objet présenté dans les neuf cadrans de l'espace en face de lui (au-dessus, en face et en dessous de la ligne du regard, à gauche, au milieu et à droite du point de fixation central) et analyser comment il coordonne son regard avec le mouvement de sa main (en prenant en considération l'impact de son atteinte motrice).

Enfin, concernant l'évaluation des traitements visuo-constructifs, de nombreux tests sont disponibles sur le marché tant pour la copie de figures géométriques – Nepsy 2 (Korkman et al., 2012), DTVP 3 (Hammil et al., 2013), Beery-VMI (Beery et al., 2010), pour la reproduction/construction de modèles à l'aide de cubes unicolores (Nepsy 2 ; Korkman et al., 2012), de cubes bicolores (WPPSI IV; Wechsler, 2014, WISC V; Wechsler, 2016) ou de triangles (K-ABC II ; Kaufman & Kaufman, 2008). Cependant une analyse qualitative des réalisations des enfants et des stratégies utilisées est indispensable en raison de l'implication de nombreux processus visuo-perceptifs (perception des lignes obliques, groupement perceptif, discrimination figure-fond et traitement local-global) et visuo-spatiaux (orientation de chaque pièce, compréhension des relations spatiales des pièces au sein des modèles en trois dimensions), des répercussions de l'atteinte motrice des membres supérieurs et du ralentissement de la vitesse de traitement de l'information (pour toutes les tâches chronométrées).

Association avec l'eye tracking

L'évaluation conjointe pourrait également être associée avec la technologie de l'eye tracking. En effet, cette technologie commercialisée par de nombreuses firmes dans des buts de recherche, d'analyse marketing et de meilleure immersion dans les jeux vidéos, est également utilisée en clinique pour donner accès à l'outil informatique et à la communication pour les personnes présentant un handicap moteur sévère, développemental (paralysie cérébrale, syndrome de Rett) ou acquis (sclérose latérale amyotrophique, traumatisme crânien, tétraplégie consécutive à une lésion de la moelle épinière). La société TOBII (filiale Tobii DynaVox Inc., Pittsburgh, Pennsylvanie, USA) a beaucoup investi dans les aspects cliniques et a développé des logiciels d'analyse du regard en lien avec l'interface d'eye tracking permettant, d'une part d'obtenir des informations concernant la qualité et la précision de la fixation dans les différents

cadres de l'écran d'ordinateur mais également la capacité de poursuite oculaire d'une cible en déplacement (processus de calibration préalable à toute utilisation de l'interface). D'autre part, le logiciel « Tobii gaze viewer » permet sur base de n'importe quelle image/photographie présentée à l'écran (au choix selon les capacités et/ou les centres d'intérêt de l'enfant) d'obtenir une analyse en direct des stratégies du regard de l'enfant (oculomotricité) en termes de points de fixation (localisation et durée), déplacements du regard, chronologie des points de fixation et exploration de l'image présentée. Ces stratégies peuvent donc également être évaluées consécutivement à l'aide de différents types de présentation (photographies, images en couleurs, dessins au trait) et de complexité croissante (fond bien ou peu différencié, personnages/objets séparés-proches-enchevêtrés) afin de déterminer si l'enfant l'impact de ces présentations sur ses performances oculomotrices.

Dans un second temps, les tests de la BEVPS pourraient être adaptés avec cette technologie pour les enfants présentant une motricité limitée au niveau des membres supérieurs. Ils pourraient effectivement sélectionner la réponse correcte de chaque item en regardant la cible pendant un temps déterminé (validation par fixation), en clignant des yeux (validation par clignement) ou en appuyant sur un contacteur placé à l'endroit le plus approprié en fonction des capacités motrices résiduelles. Sur le plan visuel, l'enfant doit pouvoir orienter volontairement son regard mais compte tenu de la présentation des items au sein des différents tests de la batterie, la sélection de la réponse correcte ne nécessiterait pas la fixation d'un point précis car cette réponse pourrait être validée avec le regard posé au sein d'un cadre de 10 centimètres de côté (pour toute évaluation avec un écran de 17 pouces).

Ensuite, si l'on considère l'aspect thérapeutique, cette technologie pourrait également être très utile pour la rééducation des troubles oculo-moteurs et certains aspects des processus visuo-attentionnels. En effet, grâce à un travail très progressif de chaque processus dans un ordre spécifique et basé sur des exercices très ludiques (Sensory Eye-FX software, SensoryGuru Ltd, East Sussex, England), les différentes capacités oculomotrices sont rééduquées et permettent donc à l'enfant une prise d'informations visuelles de meilleure qualité.

Cela permettra également une utilisation optimale de l'interface d'eye tracking pour utiliser l'outil informatique et donc communiquer avec les autres (en cas d'absence de langage oral intelligible), se déplacer avec leur chaise roulante électronique ou encore contrôler la télévision pour choisir leurs programmes préférés.

Utilité dans d'autres pathologies neuro-développementales

Cette évaluation conjointe pourrait également être proposée aux enfants présentant d'autres troubles neuro-développementaux afin de définir un profil de compétences – déficits comme proposé pour les enfants avec PC.

Durant ce travail de thèse, différents enfants atteints du syndrome de délétion 22q11.2 ont été évalué à l'aide de la BEVPS (traitements perceptifs et spatiaux) afin de faire le lien d'une part avec les observations cliniques et les résultats du bilan neuropsychologique et d'autre part avec les difficultés mises en évidence dans l'apprentissage du calcul. Cependant, à l'heure actuelle ces résultats n'ont été utilisés que dans le but de préciser le profil cognitif de ces enfants et de guider les propositions d'adaptation pour la maison et les apprentissages scolaires.

Néanmoins, compte tenu que plusieurs études (Oskarsdóttir et al., 2005; Woodin et al., 2001; Zinkstok & Amelsvoort, 2005) ont mis en évidence un profil cognitif marqué par des troubles non verbaux majoritairement visuo-spatiaux chez ces enfants, il semblerait intéressant de les évaluer avec la BEVPS complète afin de mieux spécifier ces troubles.

De même, différents enfants atteints du syndrome épileptique des pointes-ondes continues durant le sommeil lent (POCS) avec foyer occipital et hospitalisés au centre neurologique William Lennox ont été évalué à l'aide de la BEVPS, toujours avec pour objectif de préciser leur profil cognitif en lien avec les autres évaluations neuropsychologiques déjà réalisées au centre, de faire le lien avec les résultats des électroencéphalogrammes et de l'imagerie cérébrale et de proposer des adaptations pour les différentes prises en charge thérapeutique et la scolarité de ces enfants. Plusieurs études (Chilosi, Brovedani, Moscatelli, Bonanni, & Guerrini, 2006; Eriksson, Kylliäinen, Hirvonen, Nieminen, & Koivikko, 2003; Kylliäinen, Heinonen, Nieminen, & Eriksson, 2006) ont fait le lien entre la présence de POCS occipitaux et la présence de

troubles qualifiés d'agnosie visuelle. Il semble donc intéressant de pouvoir les caractériser malgré l'importante hétérogénéité causée par la localisation et le nombre de foyers épileptogènes, le traitement médicamenteux et la durée de l'épilepsie, du moins pour fournir un profil de compétences-déficits crucial pour une prise en charge thérapeutique de qualité.

La littérature a également mis en évidence des troubles visuo-perceptifs et visuo-spatiaux chez les enfants avec spina-bifida et hydrocéphalie (Swain et al., 2009) ou avec syndrome de Williams (Atkinson et al., 2001; Atkinson et al., 1997; Bellugi, Lichtenberger, Jones, Lai, & George, 2000; Heiz, Majerus, & Barisnikov, 2017.; Wang, Doherty, Rourke, & Bellugi, 1995), même si chez ces derniers l'évaluation du profil visuo-spatial est déjà présent dans les recherches depuis de nombreuses années.

Enfin, les enfants avec des antécédents neurologiques mise en évidence lors de l'anamnèse pourraient également réaliser de manière systématique cette évaluation conjointe en raison de la sensibilité des voies visuelles aux différents troubles pouvant survenir dans la prime enfance (Chokron, 2015; Chokron, Cavézian, & de Agostini, 2010) tels que les épisodes d'hypoxie-anoxie pouvant survenir lors de l'accouchement (souffrance fœtale aigue) ou durant une anesthésie générale en bas âge, la grande prématurité (Butcher et al., 2012; Haard et al., 2004; O'Reilly et al., 2010), les syndromes ou encéphalopathies épileptiques, ou encore les traumatismes crâniens. Cela permettrait, le cas échéant, d'exclure la présence de tels troubles comme étant la cause d'autres troubles cognitifs et/ou de troubles d'apprentissage.

Ce travail de thèse représente donc le point de départ de toute une série de réflexions tant sur le plan de la recherche que pour le travail clinique avec ces enfants. Il plaide en tout cas pour la mise en place systématique de cette évaluation conjointe chez tous les enfants avec PC dès la deuxième maternelle afin de pouvoir agir précocement (dès le début de l'enseignement primaire) tant au niveau des propositions d'adaptations qu'au niveau de la prise en charge.

LIMITES ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse représente la première recherche qui s'intéresse aux différents processus visuo-perceptifs en évaluant leur développement typique et leur développement au sein de la paralysie cérébrale à l'aide de tests adaptés aux troubles moteurs et neuro-ophtalmologiques associés à cette pathologie.

Notre travail a donc tenté de définir un profil de compétences/déficits visuo-perceptifs au sein d'un échantillon d'enfants avec PC en comparant leurs performances avec celles d'enfants TDca et TDnv. Cependant, la taille de l'échantillon n'a pas permis de définir précisément des profils visuo-perceptifs selon les types d'atteinte motrice ou la présence d'un ou plusieurs troubles associés. Malgré l'utilisation de critères d'inclusion stricts d'étiologies (pas d'encéphalopathie, de maltraitance, ni méningite), de types de lésions cérébrales (pas de malformation), d'atteinte uniquement dans la période périnatale et de forme de PC (spasticité), l'hétérogénéité des caractéristiques médicales et des troubles associés n'a pas permis de regrouper les enfants dans des groupes de taille suffisante pour évaluer avec finesse l'influence de ces troubles, seuls ou en association, sur les processus visuo-perceptifs.

Dans un second temps, l'augmentation significative de la taille de l'échantillon permettrait d'une part d'inclure des enfants présentant les différentes formes de PC (spasticité, dyskinésie, ataxie, mixte) afin de préciser quels processus visuo-perceptifs sont atteints dans chacune de ces formes et de confirmer la prévalence plus élevée de ces troubles au sein de la spasticité par rapport aux autres formes, mise en évidence dans différentes études (Pueyo et al., 2009; Stiers et al., 2002). D'autre part, l'agrandissement de l'échantillon permettrait de constituer différents groupes d'enfants pour tenter de caractériser les troubles visuo-perceptifs selon les différentes caractéristiques et troubles associés présents au sein de chacun de ces groupes spécifiques, en suivant par exemple la méthodologie utilisée par Fazzi et al. (2009) pour regrouper des enfants avec PC présentant tous une diplégie spastique, une naissance prématurée et des lésions de leucomalacie périventriculaire.

Enfin, notre travail a souffert d'une proportion importante de données manquantes concernant la présence de troubles neurovisuels (atteinte des champs visuels, troubles oculomoteurs), la présence de troubles ophtalmologiques spécifiques (amblyopie, nystagmus) ayant des répercussions directes sur la prise d'informations visuelles et le

type de lésion cérébrale. En effet, bien que les troubles de la réfraction et le strabisme soient systématiquement recherchés, l'analyse des troubles plus spécifiques ne semble pas systématique lors des bilans de dépistage ophtalmologique. De ce fait, les données ne sont disponibles ni dans le dossier médical de l'enfant ni auprès des parents. Sur le plan de l'imagerie cérébrale, seuls les protocoles rédigés par différents neuro-radiologues sont disponibles pour la majorité des enfants, les clichés n'ayant été retrouvés que pour une dizaine d'enfants, ce qui rend la catégorisation difficile en fonction du nombre important de lésions complexes et peu spécifiques.

Les futures recherches devront donc systématiser la réalisation d'un bilan neuro-ophtalmologique complet chez tous les enfants en raison de l'influence négative significative de ces troubles sur les processus visuo-perceptifs et spatiaux (Fazzi et al., 2004, 2007; Kozeis et al., 2007). Il serait également très intéressant de pouvoir systématiser la réalisation d'une imagerie cérébrale afin de pouvoir catégoriser les lésions cérébrales avec précision et de tenter de préciser les associations entre les lésions cérébrales, les troubles visuo-perceptifs et les troubles neurovisuels (atteinte des champs visuels et troubles oculomoteurs) tels que déjà établie par de nombreux auteurs (Fazzi et al., 2004, 2009, 2012; Guzzetta, Mercuri, et al., 2001; Pagliano et al., 2007; Salati et al., 2002; Stiers et al., 2001; van den Hout et al., 2004) avec les lésions de leucomalacie périventriculaire. Dans le cadre du diagnostic de la paralysie cérébrale, une IRM est réalisée de manière systématique dans les premiers mois ou premières années de vie de l'enfant afin d'objectiver les lésions mais n'est plus proposée par la suite sauf en présence de certains troubles associés tels que l'épilepsie ou en cas de phénomène neurologique aigu (commotion ou méningite par exemple). En effet, la lésion étant supposée non évolutive et la nécessité d'anesthésie générale de courte durée de l'enfant en raison de ses mouvements involontaires et incontrôlés (dyskinésie, ataxie) et de l'anxiété liée à leur lourd passé médical, la réalisation d'une IRM en âge scolaire est proposée uniquement au cas par cas.

CONCLUSION

Dans ce travail de thèse, nous avons exploré les processus visuo-perceptifs au sein du développement typique et de la paralysie cérébrale en nous basant sur une représentation intégrée de tous les processus dès la saisie des informations visuelles jusqu'à leur utilisation dans nos interactions avec le monde environnant, en passant par la sélection et le traitement de ces informations. La BEVPS a été créée afin d'évaluer spécifiquement les différents processus appartenant aux différents niveaux de traitements perceptifs pré-sémantiques en prenant en considération le fonctionnement particulier des enfants avec paralysie cérébrale (atteinte motrice, troubles neuro-ophtalmologiques).

L'évaluation des enfants TD avec cette batterie de tests a mis en évidence un développement au long cours des processus visuo-perceptifs qui s'étend de l'âge de 5 ans à l'âge adulte. Plus précisément, les différents processus présentent des trajectoires développementales indépendantes, même au sein d'un même niveau de traitement. Le traitement de l'objet se développe avant le traitement des caractéristiques. Au sein du traitement de l'objet, les processus de transformation (représentations de l'objet indépendantes du point de vue) se développent avant les processus intégratifs (représentations de l'objet dépendantes du point de vue). Ces données développementales contredisent donc la hiérarchisation des processus du modèle d'Humphreys et Riddoch mais pas leur répartition au sein des différents niveaux de traitement (traitement des caractéristiques et traitement de l'objet).

Par ailleurs, ce travail de thèse nous a permis de montrer que tous les processus visuo-perceptifs sont déficitaires chez les enfants avec PC, y compris quand leurs performances sont comparées aux enfants de même niveau de raisonnement non verbal (à l'exception du traitement local-global). Les déficits visuo-perceptifs ne peuvent donc pas être imputés aux limitations intellectuelles de ces enfants avec PC. Ensuite, la comparaison des courbes développementales des enfants avec CP avec celles des enfants TD a mis en évidence un retard stable et persistant. Cela signifie que dès le plus jeune âge, les performances des enfants avec PC sont significativement inférieures et que ce retard reste significatif jusqu'à 13-14 ans. Ce retard augmente

même avec l'âge pour le traitement des composants de base d'orientation et de position et pour le processus de groupement perceptif. Enfin, nos données ont mis en évidence un retard de 6 à 8 ans dans le développement des différents processus chez les enfants avec PC âgés de 13-14 ans. Ces résultats plaident donc pour une atteinte significative de la voie ventrale menant à la construction d'un percept cohérent des objets.

Sur le plan clinique, l'intérêt de ces résultats sera de pouvoir définir un profil spécifique de compétences et de déficits en analysant, au niveau individuel, les processus qui sont atteints et ceux qui sont préservés. Mais cela permettra aussi, au sein des processus déficitaires de déterminer si certains niveaux de difficulté (type de dessins, nombre de dessins, type de présentation,...). La précision de ce profil constituera la base de la prise en charge et des propositions d'adaptation afin de soutenir l'enfant avec PC tant dans les activités de la vie quotidienne que pour les apprentissages scolaires. Ce profil devra également être complété avec l'évaluation des différents niveaux de traitement des informations visuelles (saisie, sélection, traitement perceptif et spatial et interaction avec l'environnement) présentés au sein de notre représentation (Figure 2, page 24) et avec l'évaluation des autres fonctions cognitives

BIBLIOGRAPHIE

- Amador-Campos, J. A., & Kirchner-Nebot, T. (1997). Relations of scores on Children's Embedded Figures Test with age, item difficulty and internal consistency. *Perceptual and Motor Skills*, 85(2), 675–682.
- Ancel, P.-Y. (2004). Handicap neuro-sensoriel grave de l'enfant grand prématuré: aspects épidémiologiques. *La Revue Sage-Femme*, 3(6), 270–283.
- Anthonioz, C., Loisel, D., Delorme, B., Pasco-Papon, A., Aube, C., & Caron, C. (2008). pédiatrie - Aspects IRM de l'encéphalopathie anoxo-ischémique du nouveau-né à terme et du prématuré.
- Appelle, S. (1972). Perception and discrimination as a function of stimulus orientation: the "oblique effect" in man and animals. *Psychological Bulletin*, 78(4), 266.
- Arents, A., Cans, C., & Marchal, F. (2013). Études épidémiologiques relatives aux troubles neuropsychologiques dans la paralysie cérébrale. *ANAE. Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez L'enfant*, (126–27), 500–510.
- Atkinson, J., Anker, S., Braddick, O., Nokes, L., Mason, A., & Braddick, F. (2001). Visual and visuospatial development in young children with Williams syndrome. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 43(5), 330–337.
- Atkinson, J., King, J., Braddick, O., Nokes, L., Anker, S., & Braddick, F. (1997). A specific deficit of dorsal stream function in Williams' syndrome. *Neuroreport*, 8(8), 1919–1922.
- Aubry, M. J., Francis, C., Francis, M., & Tsimba, V. (2002). La conjugaison des yeux au présent de l'IMC. *Motricité Cérébrale*, 23(3), 126–136.
- Badawi, N., Felix, J. F., Kurinczuk, J. J., Dixon, G., Watson, L., Keogh, J. M., ... Stanley, F. J. (2005). Cerebral palsy following term newborn encephalopathy: a population-based study. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47(5), 293–298.
- Ballaz, C., Boutsen, L., Peyrin, C., Humphreys, G. W., & Marendaz, C. (2005). Visual search for object orientation can be modulated by canonical orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 31(1), 20.
- Barca, L., Cappelli, F. R., Di Giulio, P., Staccioli, S., & Castelli, E. (2010). Outpatient assessment of neurovisual functions in children with Cerebral Palsy. *Research in Developmental Disabilities*, 31(2), 488–495.

- Barca, L., Pezzulo, G., & Castelli, E. (2010). Egocentric and allocentric spatial references in children with Cerebral Palsy. In *Proceedings of the 2010 annual meeting of the cognitive science society*.
- Battelli, L., Casco, C., & Sartori, G. (1997). Dissociation between contour-based and texture-based shape perception: a single case study. *Visual Cognition*, 4(3), 275–310.
- Bax, M., Goldstein, M., Rosenbaum, P., Leviton, A., Paneth, N., Dan, B., ... Damiano, D. (2005). Proposed definition and classification of cerebral palsy, April 2005. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47(8), 571–576.
- Beery, K.E., Buktenica, N.A., & Beery, N.A. (2010). Beery VMI-6th Edition. Pearson.
- Behrmann, M., & Kimchi, R. (2003). What does visual agnosia tell us about perceptual organization and its relationship to object perception? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29(1), 19.
- Bellugi, U., Lichtenberger, L., Jones, W., Lai, Z., & George, M. S. (2000). I. The neurocognitive profile of Williams Syndrome: a complex pattern of strengths and weaknesses. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(Supplement 1), 7–29.
- Benjamini, Y., & Hochberg, Y. (1995). Controlling the false discovery rate: a practical and powerful approach to multiple testing. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 289–300.
- Benton, A. L., Hamsher, K. D., Varney, N. R., & Spreen, O. (1983). *Judgment of line orientation*. Oxford University Press New York.
- Bérard, C. (2008). *La paralysie cérébrale de l'enfant: Guide de la consultation-Examen neuro-orthopédique du tronc et des membres inférieurs*. Sauramps médical.
- Bezrukikh, M. M., & Terebova, N. N. (2009). Characteristics of the development of visual perception in five-to seven-year-old children. *Human Physiology*, 35(6), 684–689.
- Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: a theory of human image understanding. *Psychological Review*, 94(2), 115.
- Bodimeade, H. L., Whittingham, K., Lloyd, O., & Boyd, R. N. (2013). Executive function in children and adolescents with unilateral cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(10), 926–933.

- Bonin, P., Gelin, M., & Bugaiska, A. (2014). Animates are better remembered than inanimates: Further evidence from word and picture stimuli. *Memory & Cognition*, 42(3), 370–382.
- Bottcher, L., Flachs, E. M., & Uldall, P. (2010). Attentional and executive impairments in children with spastic cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 52(2). doi/10.1111/j.1469-8749.2009.03533.x/full
- Boucart, M. (n.d.). Les modèles de reconnaissance des objets. In *Vision: Aspects Perceptifs et Cognitifs* (Solal). Marseille: Boucart M., Hénaff M.A., Belin C.
- Bouis, C., Cavézian, C., & Chokron, S. (2011). Les troubles neurovisuels dans l'épilepsie de l'enfant: un état des lieux. *Revue de Neuropsychologie*, 3(3), 155–160.
- Bova, S. M., Fazzi, E., Giovenzana, A., Montomoli, C., Signorini, S. G., Zoppello, M., & Lanzi, G. (2007). The development of visual object recognition in school-age children. *Developmental Neuropsychology*, 31(1), 79–102.
- Bramão, I., Reis, A., Petersson, K. M., & Faísca, L. (2011). The role of color information on object recognition: A review and meta-analysis. *Acta Psychologica*, 138(1), 244–253.
- Brizzolara, D., Pecini, C., Brovedani, P., Ferretti, G., Cipriani, P., & Cioni, G. (2002). Timing and type of congenital brain lesion determine different patterns of language lateralization in hemiplegic children. *Neuropsychologia*, 40(6), 620–632.
- Brouwer, A., Groenendaal, F., van Haastert, I.-L., Rademaker, K., Hanlo, P., & de Vries, L. (2008). Neurodevelopmental outcome of preterm infants with severe intraventricular hemorrhage and therapy for post-hemorrhagic ventricular dilatation. *The Journal of Pediatrics*, 152(5), 648–654.
- Bruce, V., Green, P. R., & Bruyer, R. (1993). *La perception visuelle: physiologie, psychologie et écologie*. Presses universitaires de Grenoble.
- Bruno, N., & Paolo Battaglini, P. (2008). Integrating perception and action through cognitive neuropsychology (broadly conceived). *Cognitive Neuropsychology*, 25(7–8), 879–890.

Butcher, P. R., Bouma, A., Stremmelaar, E. F., Bos, A. F., Smithson, M., & Van Braeckel, K. N. (2012). Visuospatial perception in children born preterm with no major neurological disorders. *Neuropsychology*, 26(6), 723.

Butter, C. M., & Trobe, J. D. (1994). Integrative agnosia following progressive multifocal leukoencephalopathy. *Cortex*, 30(1), 145–158.

Cannard, C., Bonthoux, F., Blaye, A., Scheuner, N., Schreiber, A.-C., & Trinquart, J. (2006). BD2I: Normes sur l'identification de 274 images d'objets et leur mise en relation chez l'enfant français de 3 à 8 ans. *L'Année Psychologique*, 106, 375–396.

Cans, C. (2005). Épidémiologie de la paralysie cérébrale («Cerebral Palsy» ou CP). *Motricité Cérébrale: Réadaptation, Neurologie Du Développement*, 26(2), 51–58.

Caramazza, A., & Shelton, J. R. (1998). Domain-specific knowledge systems in the brain: The animate-inanimate distinction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 10(1), 1–34.

Carlsson, G. (1997). Memory for words and drawings in children with hemiplegic cerebral palsy. *Scandinavian Journal of Psychology*, 38(4), 265–273.

Carlsson, M., Hagberg, G., & Olsson, I. (2003). Clinical and aetiological aspects of epilepsy in children with cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 45(6), 371–376.

Chaix, Y., & Albaret, J.-M. (2014). Trouble de l'Acquisition de la Coordination et déficits visuo-spatiaux. *Développements*, (2), 32–43.

Charnallet, A. (1998). Evaluation des agnosies visuelles. *Vision: Aspects Perceptifs et Cognitifs*. Marseille: Solal, 279–301.

Chikhman, V., Shelepin, Y., Foreman, N., Merkuljev, A., & Pronin, S. (2006). Incomplete figure perception and invisible masking. *Perception*, 35(11), 1441–1457.

Chilosi, A. M., Brovedani, P., Moscatelli, M., Bonanni, P., & Guerrini, R. (2006). Neuropsychological findings in idiopathic occipital lobe epilepsies. *Epilepsia*, 47(s2), 76–78.

Chokron, S. (2015). Approche neuropsychologique des troubles neurovisuels chez l'enfant. *Revue de Neuropsychologie*, 7(1), 41–49.

- Chokron, S., Cavézian, C., & de Agostini, M. (2010). Troubles neurovisuels chez l'enfant: Sémiologie, retentissement sur les apprentissages et dépistage. *Développements*, (3), 17–25.
- Chokron, S., & Demonet, J.-F. (2010). *Approche neuropsychologique des troubles des apprentissages*. Marseille: Solal Editeurs.
- Chokron, S., Pieron, M., & Zalla, T. (2015). Troubles du spectre de l'autisme et troubles de la fonction visuelle: revue critique, implications théoriques et cliniques. *L'information Psychiatrique*, 90(10), 819–826.
- Chokron, S. (2015). Evaluation of visuo-spatial abilities (EVA): A simple and rapid battery to screen for CVI in young children. In *Impairment of vision due to disorders of the visual brain in childhood: A practical approach* (American Foudation for the Blind (AFB) Press). New York: A. H. Lueck, G. N. Dutton.
- Christ, S. E., White, D., Brunstrom, J. E., & Abrams, R. A. (2003). Inhibitory control following perinatal brain injury. *Neuropsychology*, 17(1), 171.
- Chun, M. M., Golomb, J. D., & Turk-Browne, N. B. (2011). A taxonomy of external and internal attention. *Annual Review of Psychology*, 62, 73–101.
- Cioni, G., Sales, B., Paolicelli, P. B., Petacchi, E., Scusa, M. F., & Canapicchi, R. (1999). MRI and clinical characteristics of children with hemiplegic cerebral palsy. *Neuropediatrics*, 30(5), 249–255.
- Cobrinik, L. (1959). The performance of brain-injured children on hidden-figure tasks. *The American Journal of Psychology*, 72(4), 566–571.
- Cooper, L. A., Schacter, D. L., Ballesteros, S., & Moore, C. (1992). Priming and recognition of transformed three-dimensional objects: effects of size and reflection. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 18(1), 43.
- Creem, S. H., & Proffitt, D. R. (2001). Defining the cortical visual systems: "what", "where", and "how." *Acta Psychologica*, 107(1), 43–68.
- Croteau, P., Loranger, M., & Laporte, P. (2002). Fonctionnement cognitif et neuropsychologie clinique des enfants atteints de déficience motrice cérébrale: aspects cognitifs et neuropsychologiques cliniques. *Motricité Cérébrale*, 23(4), 175–187.

- Dalvand, H., Dehghan, L., Hadian, M. R., Feizy, A., & Hosseini, S. A. (2012). Relationship between gross motor and intellectual function in children with cerebral palsy: a cross-sectional study. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 93(3), 480–484.
- De Renzi, E., & Lucchelli, F. (1993). The fuzzy boundaries of apperceptive agnosia. *Cortex*, 29(2), 187–215.
- Dekker, T., Mareschal, D., Sereno, M. I., & Johnson, M. H. (2011). Dorsal and ventral stream activation and object recognition performance in school-age children. *NeuroImage*, 57(3), 659–670.
- Delacy, M. J., & Reid, S. M. (2016). Profile of associated impairments at age 5 years in Australia by cerebral palsy subtype and Gross Motor Function Classification System level for birth years 1996 to 2005. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 58(S2), 50–56.
- Di Lieto, M. C., Brovedani, P., Pecini, C., Chilosi, A. M., Belmonti, V., Fabbro, F., ... others. (2017). Spastic diplegia in preterm-born children: Executive function impairment and neuroanatomical correlates. *Research in Developmental Disabilities*, 61, 116–126.
- Dolphin, J. E., & Cruickshank, W. M. (1951). The figure-background relationship in children with cerebral palsy. *Journal of Clinical Psychology*, 7(3), 228–231.
- Dutton, G. N. (2015). The Brain and Vision. In Dutton, G.N & Lueck, A.H., *Vision and the Brain: Understanding Cerebral Visual Impairment in children*. New York: AFB Press.
- Eliasson, A.-C., Krumlinde-Sundholm, L., Rösblad, B., Beckung, E., Arner, M., Öhrvall, A.-M., & Rosenbaum, P. (2006). The Manual Ability Classification System (MACS) for children with cerebral palsy: scale development and evidence of validity and reliability. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 48(7), 549–554.
- Elvrum, A.-K. G., Andersen, G. L., Himmelmann, K., Beckung, E., Öhrvall, A.-M., Lydersen, S., & Vik, T. (2016). Bimanual Fine Motor Function (BFMF) Classification in children with cerebral palsy: aspects of construct and content validity. *Physical & Occupational Therapy in Pediatrics*, 36(1), 1–16.

- Eriksson, K., Kylliäinen, A., Hirvonen, K., Nieminen, P., & Koivikko, M. (2003). Visual agnosia in a child with non-lesional occipito-temporal CSWS. *Brain and Development*, 25(4), 262–267.
- Falkman, K. W., Sandberg, A. D., & Hjelmquist, E. (2002). Preferred communication modes: prelinguistic and linguistic communication in non-speaking preschool children with cerebral palsy. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 37(1), 59–68.
- Farge, D. (2012). *e-semio.org, Le livre de sémiologie médicale*. Université Paris-Diderot.
- Farivar, R. (2009). Dorsal–ventral integration in object recognition. *Brain Research Reviews*, 61(2), 144–153.
- Farran, E. K. (2005). Perceptual grouping ability in Williams syndrome: Evidence for deviant patterns of performance. *Neuropsychologia*, 43(5), 815–822.
- Fazzi, E., Bova, S., Giovenzana, A., Signorini, S., Uggetti, C., & Bianchi, P. (2009). Cognitive visual dysfunctions in preterm children with periventricular leukomalacia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 51(12), 974–981.
- Fazzi, E., Bova, S. M., Uggetti, C., Signorini, S. G., Bianchi, P. E., Maraucci, I., ... Lanzi, G. (2004). Visual–perceptual impairment in children with periventricular leukomalacia. *Brain and Development*, 26(8), 506–512.
- Fazzi, E., Signorini, S. G., Bova, S. M., La Piana, R., Ondeï, P., Bertone, C., ... Bianchi, P. E. (2007). Spectrum of visual disorders in children with cerebral visual impairment. *Journal of Child Neurology*, 22(3), 294–301.
- Fazzi, E., Signorini, S. G., La Piana, R., Bertone, C., Misefari, W., Galli, J., ... Bianchi, P. E. (2012). Neuro-ophthalmological disorders in cerebral palsy: ophthalmological, oculomotor, and visual aspects. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 54(8), 730–736.
- Fedrizzi, E., Anderloni, A., Bono, R., Bova, S., Farinotti, M., Inverno, M., & Savoïardo, S. (1998). Eye-movement disorders and visual-perceptual impairment in diplegia children born preterm: a clinical evaluation. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 40(10), 682–688.

- Fennell, E. B., & Dikel, T. N. (2001). Cognitive and neuropsychological functioning in children with cerebral palsy. *Journal of Child Neurology*, 16(1), 58–63.
- Fery, P., & Morais, J. (2003). A case study of visual agnosia without perceptual processing or structural descriptions impairment. *Cognitive Neuropsychology*, 20(7), 595–618.
- Fisher, A. V., Godwin, K. E., & Seltman, H. (2014). Visual environment, attention allocation, and learning in young children: When too much of a good thing may be bad. *Psychological Science*, 25(7), 1362–1370.
- Freeman, A. W., Nguyen, V. A., & Jolly, N. (1996). Components of visual acuity loss in strabismus. *Vision Research*, 36(5), 765–774.
- Friedman-Hill, S. R., Robertson, L. C., Treisman, A., & others. (1995). Parietal contributions to visual feature binding: evidence from a patient with bilateral lesions. *Science-New York then Washington*, 853–853.
- Furmanski, C. S., & Engel, S. A. (2000). An oblique effect in human primary visual cortex. *Nature Neuroscience*, 3(6), 535–536.
- Garne, E., Dolk, H., Krägeloh-Mann, I., Ravn, S. H., Cans, C., & Group, S. C. (2008). Cerebral palsy and congenital malformations. *European Journal of Paediatric Neurology*, 12(2), 82–88.
- Gentaz, E., & Hatwell, Y. (1995). The haptic “oblique effect” in children’s and adults’ perception of orientation. *Perception*, 24(6), 631–646.
- Ghent, L. (1956). Perception of overlapping and embedded figures by children of different ages. *The American Journal of Psychology*, 69(4), 575–587.
- Gillet, P., Chabernaud, C., Batty, M., Barthélémy, C., & Jambaqué, I. (2009). La reconnaissance visuelle des objets chez l’enfant avec autisme: Résultats préliminaires à une adaptation pour enfants de la Birmingham Object Recognition Battery (BORB). *Développements*, (3), 35–44.
- Giovagnoli, A. R. (2001). Relation of sorting impairment to hippocampal damage in temporal lobe epilepsy. *Neuropsychologia*, 39(2), 140–150.

- Good, W. V., Jan, J. E., Burden, S. K., Skoczenski, A., & Candy, R. (2001). Recent advances in cortical visual impairment. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 43(1), 56–60.
- Gunn, A., Cory, E., Atkinson, J., Braddick, O., Wattam-Bell, J., Guzzetta, A., & Cioni, G. (2002). Dorsal and ventral stream sensitivity in normal development and hemiplegia. *Neuroreport*, 13(6), 843–847.
- Guzzetta, A., Fazzi, B., Mercuri, E., Bertuccelli, B., Canapicchi, R., Duin, J. van H., & Cioni, G. (2001). Visual function in children with hemiplegia in the first years of life. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 43(5), 321–329.
- Guzzetta, A., Mercuri, E., & Cioni, G. (2001). Visual disorders in children with brain lesions:: 2. Visual impairment associated with cerebral palsy. *European Journal of Paediatric Neurology*, 5(3), 115–119.
- Haard, A.-L., Aring, E., & Hellström, A. (2004). Subnormal visual perception in school-aged ex-preterm patients in a paediatric eye clinic. *Eye*, 18(6), 628–634.
- Haard, A.-L., Niklasson, A., Svensson, E., & Hellström, A. (2000). Visual function in school-aged children born before 29 weeks of gestation: a population-based study. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 42(2), 100–105.
- Hammil, D.D., Pearson, N.A., & Voress, J.K. (1993). Developmental Test of Visual Perception: Second Edition (DTVP-II). Western Psychological services.
- Hammil, D.D., Pearson, N.A., & Voress, J.K. (2013). Developmental Test of Visual Perception: Third Edition (DTVP III). Pro-Ed.
- Harrison, T. B., & Stiles, J. (2009). Hierarchical forms processing in adults and children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(2), 222–240.
- Heiz, J., Majerus, S., & Barisnikov, K. (n.d.). How Flexible is the Use of Egocentric Versus Allocentric Frame of Reference in the Williams Syndrome Population? *Archives of Clinical Neuropsychology*, 1–12. <https://doi.org/10.1093/arclin/acx097>
- Heywood, C. A., Wilson, B., & Cowey, A. (1987). A case study of cortical colour“ blindness” with relatively intact achromatic discrimination. *Journal of Neurology, Neurosurgery & Psychiatry*, 50(1), 22–29.

- Hidecker, M. J. C., Paneth, N., Rosenbaum, P. L., Kent, R. D., Lillie, J., Eulenberg, J. B., ... others. (2011). Developing and validating the Communication Function Classification System for individuals with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(8), 704–710.
- Hillis, A. E., & Caramazza, A. (1995). Cognitive and neural mechanisms underlying visual and semantic processing: Implications from “optic aphasia.” *Journal of Cognitive Neuroscience*, 7(4), 457–478.
- Himmelman, K., Beckung, E., Hagberg, G., & Uvebrant, P. (2006). Gross and fine motor function and accompanying impairments in cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 48(6), 417–423.
- Himmelman, K., & Uvebrant, P. (2011). Function and neuroimaging in cerebral palsy: a population-based study. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(6), 516–521.
- Hoon Jr, A. H. (2005). Neuroimaging in cerebral palsy: patterns of brain dysgenesis and injury. *Journal of Child Neurology*, 20(12), 936–939.
- Hovius, M., Kellenbach, M. L., Graham, K. S., Hodges, J. R., & Patterson, K. (2003). What does the object decision task measure? Reflections on the basis of evidence from semantic dementia. *Neuropsychology*, 17(1), 100.
- Humphreys, G. W., Price, C. J., & Riddoch, M. J. (1999). From objects to names: A cognitive neuroscience approach. *Psychological Research*, 62(2–3), 118–130.
- Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (1987a). *To see but not to see: A case study of visual agnosia*. Psychology Press.
- Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (1987b). Visual object processing: A cognitive neuropsychological approach. In *European International Neuropsychology Society Conference, Jun, 1984, Aachen, Germany*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (1993). *Birmingham object recognition battery*. Hove, UK: Lawrence Erlbaum Associates.
- Humphreys, G. W., & Riddoch, M. J. (2006). Features, objects, action: The cognitive neuropsychology of visual object processing, 1984–2004. *Cognitive Neuropsychology*, 23(1), 156–183.

- Irani, F. (2011). Visuo-perceptual. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (pp. 2654–2656). Springer New York.
- Ito, J.-I., Araki, A., Tanaka, H., Tasaki, T., & Cho, K. (1997). Intellectual status of children with cerebral palsy after elementary education. *Pediatric Rehabilitation*, 1(4), 199–206.
- Jacobson, L., Ygge, J., & Flodmark, O. (1998). Nystagmus in periventricular leucomalacia. *British Journal of Ophthalmology*, 82(9), 1026–1032.
- Jeannerod, M., & Jacob, P. (2005). Visual cognition: a new look at the two-visual systems model. *Neuropsychologia*, 43(2), 301–312.
- Joy, P., & Brunsdon, R. (2002). Visual agnosia and prosopagnosia in childhood: a prospective case study. *Child Neuropsychology*, 8(1), 1–15.
- Kaess, D. W. (1971). Measures of form constancy: Developmental trends. *Developmental Psychology*, 4(2), 296.
- Kanisza, G. (1979). *The Organization of Vision*. Praeger. New York.
- Kaufman, N. L., & Kaufman, A. . (2008). KABC-II Batterie pour l'examen psychologique de l'enfant- Deuxième édition. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.
- Kirchner Nebot, T. (1988). Sex differences among children on embedded tasks. *Perceptual and Motor Skills*, 67(3), 972–974.
- Koeda, T., Inoue, M., & Takeshita, K. (1997). Constructional dyspraxia in preterm diplegia: isolation from visual and visual perceptual impairments. *Acta Paediatrica*, 86(10), 1068–1073.
- Kolk, A., Beilmann, A., Tomberg, T., Napa, A., & Talvik, T. (2001). Neurocognitive development of children with congenital unilateral brain lesion and epilepsy. *Brain and Development*, 23(2), 88–96.
- Korkman, M., Kemp, S. L., & Kirk, U. (2012). Bilan neuropsychologique de l'enfant [NEPSY-II]. ECPA.
- Korkman, M., Kirk, U., Kemp, S. L., & Plaza, M. (2003). *Nepsy, bilan neuropsychologique de l'enfant*. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.

- Kozeis, N., Anogeianaki, A., Mitova, D. T., Anogianakis, G., Mitov, T., & Klisarova, A. (2007). Visual function and visual perception in cerebral palsied children. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 27(1), 44–53.
- Krägeloh-Mann, I., & Horber, V. (2007). The role of magnetic resonance imaging in elucidating the pathogenesis of cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(2), 144–151.
- Kramer, J. H., Ellenberg, L., Leonard, J., & Share, L. J. (1996). Developmental sex differences in global-local perceptual bias. *Neuropsychology*, 10(3), 402.
- Kylliäinen, A., Heinonen, H., Nieminen, P., & Eriksson, K. (2006). Occipital CSWS and visual agnosia. *Epilepsia*, 47, 34.
- Lachance, J. A., & Mazzocco, M. M. (2006). A longitudinal analysis of sex differences in math and spatial skills in primary school age children. *Learning and Individual Differences*, 16(3), 195–216.
- Larroque, B., Ancel, P.-Y., Marret, S., Marchand, L., André, M., Arnaud, C., ... others. (2008). Neurodevelopmental disabilities and special care of 5-year-old children born before 33 weeks of gestation (the EPIPAGE study): a longitudinal cohort study. *The Lancet*, 371(9615), 813–820.
- Laveault, D., & Grégoire, J. (2002). *Introduction aux théories des tests: en psychologie et en sciences de l'éducation*. De Boeck Supérieur.
- Lawson, R. (1999). Achieving visual object constancy across plane rotation and depth rotation. *Acta Psychologica*, 102(2), 221–245.
- Lezak, M. D. (2004). *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press, USA.
- Lidzba, K., Staudt, M., Wilke, M., & Krägeloh-Mann, I. (2006). Visuospatial deficits in patients with early left-hemispheric lesions and functional reorganization of language: consequence of lesion or reorganization? *Neuropsychologia*, 44(7), 1088–1094.
- Link, S. W., & Tindall, A. D. (1971). Speed and accuracy in comparative judgments of line length. *Perception & Psychophysics*, 9(3), 284–288.

- Lueck, A.H., D., G. N. (2015). Impairment of Vision due to damage to the brain. In A. Lueck & G. Dutton, *Vision and the Brain: Understanding Cerebral Visual Impairment in children*. New York: AFB Press.
- Mapelli, D., & Behrmann, M. (1997). The role of color in object recognition: Evidence from visual agnosia. *Neurocase*, 3(4), 237–247.
- Marendaz, C., Rousset, S., & Charnallet, A. (2003). Reconnaissance des scènes, des objets et des visages. A. Delorme & M. Fluckiger (Eds.), *Perception et Réalité*. Montréal: Gaëtan Morin Editeur.
- Marr, D. (1982). A computational investigation into the human representation and processing of visual information. *WH San Francisco: Freeman and Company*, 1(2).
- Marr, D., & Nishihara, H. K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 200(1140), 269–294.
- Martin, M. (2006). Test of Visual Perceptual Skills - 3 (TVPS-3). WPS Publish.
- Mazeau, M. (1995). Déficits visuo-spatiaux et dyspraxies de l'enfant. Du trouble à la rééducation. In *Collection Bois-Larris*. Masson Paris.
- Mazeau, M., & Lostec, C. L. (2010). *L'enfant dyspraxique et les apprentissages* (1re ed.). Issy-les-Moulineaux: Elsevier Masson.
- Mazeau, M., & Pouhet, A. (2014). *Neuropsychologie et troubles des apprentissages chez l'enfant: du développement typique aux dys-* (2e édition). Paris: Elsevier Masson.
- Menken, C., Cermak, S. A., & Fisher, A. (1987). Evaluating the visual-perceptual skills of children with cerebral palsy. *American Journal of Occupational Therapy*, 41(10), 646–651.
- Merten, T. (2006). An analysis of the VOSP Silhouettes Test with neurological patients. *Psychology Science*, 48(4), 451.
- Mesmin, R., P.Wallon, C. (2009). Test de la Figure Complexe de Rey. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.
- Milner, A. D., & Goodale, M. A. (2008). Two visual systems re-viewed. *Neuropsychologia*, 46(3), 774–785.

Milner, A. D., Goodale, M. A., & Vingrys, A. J. (1995). The visual brain in action (Vol. 27). *Oxford Psychology Series. Oxford University Press, Oxford.*

Morris, C. (2007). Definition and classification of cerebral palsy: a historical perspective. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(s109), 3–7.

Nagai, J., & Yokosawa, K. (2003). What regulates the surface color effect in object recognition: Color diagnosticity or category. *Technical Report on Attention and Cognition*, 28, 1–4.

Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive Psychology*, 9(3), 353–383.

Nayar, K., Franchak, J., Adolph, K., & Kiorpes, L. (2015). From local to global processing: The development of illusory contour perception. *Journal of Experimental Child Psychology*, 131, 38–55.

Numata, Y., Onuma, A., Kobayashi, Y., SATO-SHIRAI, I., Tanaka, S., Kobayashi, S., ... Haginoya, K. (2013). Brain magnetic resonance imaging and motor and intellectual functioning in 86 patients born at term with spastic diplegia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(2), 167–172.

O'Reilly, M., Vollmer, B., Vargha-Khadem, F., Neville, B., Connelly, A., Wyatt, J., ... De Haan, M. (2010). Ophthalmological, cognitive, electrophysiological and MRI assessment of visual processing in preterm children without major neuromotor impairment. *Developmental Science*, 13(5), 692–705.

Ortibus, E. L., De Cock, P. P., & Lagae, L. G. (2011). Visual perception in preterm children: what are we currently measuring? *Pediatric Neurology*, 45(1), 1–10.

Ortibus, E., Laenen, A., Verhoeven, J., De Cock, P., Casteels, I., Schoolmeesters, B., ... Lagae, L. (2011). Screening for cerebral visual impairment: value of a CVI questionnaire. *Neuropediatrics*, 42(4), 138–147.

Ortibus, E., Lagae, L., Casteels, I., Demaerel, P., & Stiers, P. (2009). Assessment of cerebral visual impairment with the L94 visual perceptual battery: clinical value and correlation with MRI findings. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 51(3), 209–217.

- O'Shea, T. M. (2008). Diagnosis, treatment, and prevention of cerebral palsy in near-term/term infants. *Clinical Obstetrics and Gynecology*, 51(4), 816.
- Oskarsdóttir, S., Belfrage, M., Sandstedt, E., Viggedal, G., & Uvebrant, P. (2005). Disabilities and cognition in children and adolescents with 22q11 deletion syndrome. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 47(3), 177–184.
- Pagliano, E., Fedrizzi, E., Erbetta, A., Bulgheroni, S., Solari, A., Bono, R., ... Riva, D. (2007). Cognitive profiles and visuoperceptual abilities in preterm and term spastic diplegic children with periventricular leukomalacia. *Journal of Child Neurology*, 22(3), 282–288.
- Palisano, R. J., Hanna, S. E., Rosenbaum, P. L., Russell, D. J., Walter, S. D., Wood, E. P., ... Galuppi, B. E. (2000). Validation of a model of gross motor function for children with cerebral palsy. *Physical Therapy*, 80(10), 974–985.
- Palisano, R., Rosenbaum, P., Bartlett, D., & Livingston, M. (2007). gmfcs e et r, le Système de Classification de la Fonction Motrice Globale, étendu, revu et corrigé. *Can Child Center for Childhood Disability Research, McMaster University*.
- Palomares, M., Landau, B., & Egeth, H. (2009). Orientation perception in Williams Syndrome: Discrimination and integration. *Brain and Cognition*, 70(1), 21–30.
- Pawleko, T., Chokron, S., & Dutton, G.N. (2015). Considerations in Behavioral Diagnoses: Issues, Cautions, and Potential Outcomes. In *Impairment of vision due to disorders of the visual brain in childhood: A practical approach* (American Foundation for the Blind (AFB) Press). New York: Amanda Hall Lueck, Gordon N. Dutton.
- Peissig, J. J., & Tarr, M. J. (2007). Visual object recognition: do we know more now than we did 20 years ago? *Annu. Rev. Psychol.*, 58, 75–96.
- Pereira, A. F., & Smith, L. B. (2009). Developmental changes in visual object recognition between 18 and 24 months of age. *Developmental Science*, 12(1), 67–80.
- Peterson, M. A. (2004). Object Perception. In *The Blackwell Handbook of Sensation and Perception* (Blackwell Publishing, pp. 169–203). Goldstein E.B.
- Pirila, S., van der Meere, J. J., Rantanen, K., Jokiluoma, M., & Eriksson, K. (2011). Executive functions in youth with spastic cerebral palsy. *Journal of Child Neurology*, 26(7), 817–821.

- Pirila, S., van der Meere, J., Korhonen, P., Ruusu-Niemi, P., Kyntaja, M., Nieminen, P., & Korpela, R. (2004). A retrospective neurocognitive study in children with spastic diplegia. *Developmental Neuropsychology*, 26(3), 679–690.
- Pirila, S., van der Meere, J., Pentikainen, T., Ruusu-Niemi, P., Korpela, R., Kilpinen, J., & Nieminen, P. (2007). Language and motor speech skills in children with cerebral palsy. *Journal of Communication Disorders*, 40(2), 116–128.
- Pisella, L., André, V., Gavault, E., Le Flem, A., Luc-Pupat, E., Glissoux, C., ... Gonzalez-Monge, S. (2013). A test revealing the slow acquisition and the dorsal stream substrate of visuo-spatial perception. *Neuropsychologia*, 51(1), 106–113.
- Poirel, N., Leroux, E., Pineau, A., Houdé, O., & Simon, G. (2014). Changes in cortical thickness in 6-year-old children open their mind to a global vision of the world. *BioMed Research International*, 2014.
- Poirel, N., Mellet, E., Houdé, O., & Pineau, A. (2008). First came the trees, then the forest: developmental changes during childhood in the processing of visual local-global patterns according to the meaningfulness of the stimuli. *Developmental Psychology*, 44(1), 245.
- Poirel, N., Simon, G., Cassotti, M., Leroux, G., Perchey, G., Lanoë, C., ... others. (2011). The shift from local to global visual processing in 6-year-old children is associated with grey matter loss. *PloS One*, 6(6), e20879.
- Polat, U., Ma-Naim, T., & Spierer, A. (2009). Treatment of children with amblyopia by perceptual learning. *Vision Research*, 49(21), 2599–2603.
- Porter, M. A., & Coltheart, M. (2006). Global and local processing in Williams syndrome, autism, and Down syndrome: perception, attention, and construction. *Developmental Neuropsychology*, 30(3), 771–789.
- Pueyo, R., Junqué, C., Vendrell, P., Narberhaus, A., & Segarra, D. (2009). Neuropsychologic impairment in bilateral cerebral palsy. *Pediatric Neurology*, 40(1), 19–26.
- Purves, D. E., Augustine, G. J., Fitzpatrick, D. E., Katz, L. C., & others. (1997). Neuroscience.

Raven. (1998). *Progressive Matrices Couleurs (CPM-PM47)*. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.

Riddoch, M. J., & Humphreys, G. W. (2004). Object identification in simultanagnosia: When wholes are not the sum of their parts. *Cognitive Neuropsychology*, 21(2–4), 423–441.

Riddoch, M. J., Humphreys, G. W., Akhtar, N., Allen, H., Bracewell, R. M., & Schofield, A. J. (2008). A tale of two agnosias: distinctions between form and integrative agnosia. *Cognitive Neuropsychology*, 25(1), 56–92.

Riddoch, M. J., Humphreys, G. W., Jacobson, S., Pluck, G., Bateman, A., & Edwards, M. (2004). Impaired orientation discrimination and localisation following parietal damage: On the interplay between dorsal and ventral processes in visual perception. *Cognitive Neuropsychology*, 21(6), 597–623.

Righi, G., & Tarr, M. J. (2011). Visual Agnosia. In J. S. Kreutzer, J. DeLuca, & B. Caplan (Eds.), *Encyclopedia of Clinical Neuropsychology* (pp. 2623–2625). Springer New York.

Roid, G. ., Miller, L.J, Pomplun, M., & Koch, C. (2013). *Leiter International Performance Scale, Third Edition (Leiter-3)*. Stoelting.

Roid, G.H, & Miller, L.J. (1997). *Leiter International Performance Scale-Revised (Leiter-R)*. Stoelting.

Rosenbaum, P., Paneth, N., Leviton, A., Goldstein, M., Bax, M., Damiano, D., ... others. (2007). A report: the definition and classification of cerebral palsy April 2006. *Dev Med Child Neurol Suppl*, 109(suppl 109), 8–14.

Rumiati, R. I., Humphreys, G. W., Riddoch, M. J., & Bateman, A. (1994). Visual object agnosia without prosopagnosia or alexia: Evidence for hierarchical theories of visual recognition. *Visual Cognition*, 1(2–3), 181–225.
<https://doi.org/10.1080/13506289408402300>

Sabbadini, M., Bonanni, R., Carlesimo, G. A., & Caltagirone, C. (2001). Neuropsychological assessment of patients with severe neuromotor and verbal disabilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, 45(2), 169–179.

- Salati, R., Borgatti, R., Giammari, G., & Jacobson, L. (2002). Oculomotor dysfunction in cerebral visual impairment following perinatal hypoxia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 44(8), 542–550.
- Salavati, M., Waninge, A., Rameckers, E. A. A., Steen, J., Krijnen, W. P., Schans, C. P., & Steenbergen, B. (2017). Development and face validity of a cerebral visual impairment motor questionnaire for children with cerebral palsy. *Child: Care, Health and Development*, 43(1), 37–47.
- Schendan, H. E., & Stern, C. E. (2007). Where vision meets memory: prefrontal–posterior networks for visual object constancy during categorization and recognition. *Cerebral Cortex*, 18(7), 1695–1711.
- Scherf, K. S., Behrmann, M., Kimchi, R., & Luna, B. (2009). Emergence of global shape processing continues through adolescence. *Child Development*, 80(1), 162–177.
- Schmetz, E., Detraux, J.-J., & Barisnikov, K. (2013). Fonctions visuoperceptives chez les enfants IMC âgés de sept à 14ans: groupement perceptif et discrimination figure–fond. *Motricité Cérébrale: Réadaptation, Neurologie Du Développement*, 34(3), 87–96.
- Schmetz, E., & Rousselle, L. (2016). Le point sur les processus visuo-perceptifs chez les enfants atteints de paralysie cérébrale. *Revue de neuropsychologie*, 8(2), 137–49. <https://doi.org/10.1684/nrp.2016.0374>
- Schmetz, E., Rousselle, L., Ballaz, C., Detraux, J.-J., & Barisnikov, K. (2017). The BEVPS: A new test battery to assess visual perceptual and spatial processing abilities in 5–14 year-old children. *Applied Neuropsychology: Child*, 1–17.
- Sellers, D., Mandy, A., Pennington, L., Hankins, M., & Morris, C. (2014). Development and reliability of a system to classify the eating and drinking ability of people with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 56(3), 245–251.
- Shalev, L., & Humphreys, G. W. (2002). Implicit location encoding via stored representations of familiar objects: Neuropsychological evidence. *Cognitive Neuropsychology*, 19(8), 721–744.
- Sheridan, J., & Humphreys, G. W. (1993). A verbal-semantic category-specific recognition impairment. *Cognitive Neuropsychology*, 10(2), 143–184.

Sigurdardottir, S., Eiríksdóttir, A., Gunnarsdóttir, E., Meintema, M., Arnadóttir, U., & Vík, T. (2008). Cognitive profile in young Icelandic children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 50(5), 357–362.

Sigurdardottir, S., & Vík, T. (2011). Speech, expressive language, and verbal cognition of preschool children with cerebral palsy in Iceland. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(1), 74–80.

Sobrado, P., García-Sá, F. A., Usón, E., & others. (1999). Refractive errors in children with cerebral palsy, psychomotor retardation, and other non-cerebral palsy neuromotor disabilities. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 41(6), 396–403.

Stewart, F., Parkin, A. J., & Hunkin, N. M. (1992). Naming impairments following recovery from herpes simplex encephalitis: Category-specific? *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 44(2), 261–284.

Stiers, P., De Cock, P., & Vandenbussche, E. (1999). Separating visual perception and non-verbal intelligence in children with early brain injury. *Brain and Development*, 21(6), 397–406.

Stiers, P., van den Hout, B. M., Haers, M., Vanderkelen, R., de Vries, L. S., van Nieuwenhuizen, O., & Vandenbussche, E. (2001). The variety of visual perceptual impairments in pre-school children with perinatal brain damage. *Brain and Development*, 23(5), 333–348.

Stiers, P., & Vandenbussche, E. (2004). The dissociation of perception and cognition in children with early brain damage. *Brain and Development*, 26(2), 81–92.

Stiers, P., Vanneste, G., Coene, S., & Vandenbussche, E. (2002). Visual-perceptual impairment in a random sample of children with cerebral palsy. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 44(6), 370–382.

Stiles, J. (2000). Neural plasticity and cognitive development. *Developmental Neuropsychology*, 18(2), 237–272.

Stiles, J., Reilly, J., Paul, B., & Moses, P. (2005). Cognitive development following early brain injury: evidence for neural adaptation. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(3), 136–143.

Straub, K., & Obrzut, J. E. (2009). Effects of cerebral palsy on neuropsychological function. *Journal of Developmental and Physical Disabilities*, 21(2), 153–167.

Strauss, E., Sherman, E. M., & Spreen, O. (2006). *A compendium of neuropsychological tests: Administration, norms, and commentary*. American Chemical Society.

Swain, M. A., Joy, P., Bakker, K., Shores, E. A., & West, C. (2009). Object-based visual processing in children with spina bifida and hydrocephalus: A cognitive neuropsychological analysis. *Journal of Neuropsychology*, 3(2), 229–244.

Tanaka, J. W., & Presnell, L. M. (1999). Color diagnosticity in object recognition. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 61(6), 1140–1153.

Thibaut, J.-P., & Fayasse, M. (2009). Approche neuropsychologique du syndrome de Williams: Aspects visuo-spatiaux. *Traité de Neuropsychologie de L'enfant*. Marseille: Solal, 549–572.

Thomas, M. S., Annaz, D., Ansari, D., Scerif, G., Jarrold, C., & Karmiloff-Smith, A. (2009). Using developmental trajectories to understand developmental disorders. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 52(2), 336–358.

Thuilleux, G. (2008). Problèmes orthopédiques de l'IMC. In *Les infirmités motrices cérébrales: Réflexions et perspectives sur la prise en charge* (pp. 199–294). Elsevier Masson.

Tinelli, F., Pei, F., Guzzetta, A., Bancalé, A., Mazzotti, S., Baldassi, S., & Cioni, G. (2008). The assessment of visual acuity in children with periventricular damage: a comparison of behavioural and electrophysiological techniques. *Vision Research*, 48(10), 1233–1241.

Tourrette, C. (2014). *Évaluer les enfants avec déficiences ou troubles du développement: Déficiences motrices, sensorielles ou mentales. Troubles autistiques et troubles des apprentissages*. Dunod.

Treisman, A. M., & Gelade, G. (1980). A feature-integration theory of attention. *Cognitive Psychology*, 12(1), 97–136.

- Truscelli, D. (2008). 1980-2000: une expérience partagée. In *Les infirmités motrices cérébrales: Réflexions et perspectives sur la prise en charge* (pp. 55–118). Elsevier Masson.
- Tsai, L., Lin, K., Liao, H., & Hsieh, C. (2009). Reliability of two visual-perceptual tests for children with cerebral palsy. *American Journal of Occupational Therapy*, 63(4), 473–480.
- Tsutsui, Y., Nagahama, M., & Mizutani, A. (1999). Neuronal migration disorders in cerebral palsy. *Neuropathology*, 19(1), 14–27.
- Van Braeckel, K., Butcher, P. R., Geuze, R. H., Van Duijn, M. A., Bos, A. F., & Bouma, A. (2008). Less efficient elementary visuomotor processes in 7-to 10-year-old preterm-born children without cerebral palsy: an indication of impaired dorsal stream processes. *Neuropsychology*, 22(6), 755.
- van den Hout, B. M., de Vries, L. S., Meiners, L. C., Stiers, P., van der Schouw, Y. T., Jennekens-Schinkel, A., ... van Nieuwenhuizen, O. (2004). Visual perceptual impairment in children at 5 years of age with perinatal haemorrhagic or ischaemic brain damage in relation to cerebral magnetic resonance imaging. *Brain and Development*, 26(4), 251–261.
- Van Nechel, C. (2007). Les anomalies oculomotrices dues aux médicaments. *Bull. Soc. Belge Ophtalmol*, 304, 179–184.
- Vargha-Khadem, F., Isaacs, E., Van Der Werf, S., Robb, S., & Wilson, J. (1992). Development of intelligence and memory in children with hemiplegic cerebral palsy: The deleterious consequences of early seizures. *Brain*, 115(1), 315–329.
- Vilayphonh, M., Cavezian, C., Laloum, L., de Agostini, M., Watier, L., Vasseur, V., & Chokron, S. (2009). Évaluation des troubles visuo-attentionnels chez l'enfant de quatre à six ans. *Revue de Neuropsychologie*, 1(2), 110–119.
- Wallace, S. J. (2001). Epilepsy in cerebral palsy. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 43(10), 713–717.
- Walstab, J. E., Bell, R. J., Reddiough, D. S., Brennecke, S. P., Bessell, C. K., & Beischer, N. A. (2004). Factors identified during the neonatal period associated with

risk of cerebral palsy. *Australian and New Zealand Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 44(4), 342–346.

Wang, P. P., Doherty, S., Rourke, S. B., & Bellugi, U. (1995). Unique profile of visuo-perceptual skills in a genetic syndrome. *Brain and Cognition*, 29(1), 54–65.

Ward, R., Danziger, S., Owen, V., & Rafal, R. (2002). Deficits in spatial coding and feature binding following damage to spatiotopic maps in the human pulvinar. *Nature Neuroscience*, 5(2), 99–100.

Warrington, E. K., & James, M. (1991). *The visual object and space perception battery*. Thames Valley Test Company Bury St Edmunds.

Warrington, E. K., & Taylor, A. M. (1978). Two categorical stages of object recognition. *Perception*, 7(6), 695–705.

Weber, P., Pache, M., Lütchg, J., & Kaiser, H. J. (2004). Testbatterie für visuelle Objekt-und Raumwahrnehmung (VOSP): Normwerte für 8-bis 12-Jährige. *Klinische Monatsblätter Für Augenheilkunde*, 221(7), 583–587.

Wechsler, D. (2016). WISC-V Echelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents - cinquième édition. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.

Wechsler D. (2005). WISC-IV Echelle d'Intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents - quatrième édition. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.

Wechsler D. (2014). WPPSI-IV Echelle d'Intelligence de Wechsler pour la période Pré-scolaire et Primaire- Quatrième édition. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.

Weichbold, V., & Herka, H. (2003). Performance of hearing impaired children on Raven's Coloured Progressive Matrices Test. *International Journal of Pediatric Otorhinolaryngology*, 67(11), 1213–1217.

White, D. A., & Christ, S. E. (2005). Executive control of learning and memory in children with bilateral spastic cerebral palsy. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 11(7), 920–924.

Woodin, M., Wang, P. P., Aleman, D., McDonald-McGinn, D., Zackai, E., & Moss, E. (2001). Neuropsychological profile of children and adolescents with the 22q11. 2 microdeletion. *Genetics in Medicine*, 3(1), 34–39.

Wu, Y. W., Croen, L. A., Shah, S. J., Newman, T. B., & Najjar, D. V. (2006). Cerebral palsy in a term population: risk factors and neuroimaging findings. *Pediatrics*, 118(2), 690–697.

Yin Foo, R., Guppy, M., & Johnston, L. M. (2013). Intelligence assessments for children with cerebral palsy: a systematic review. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(10), 911–918.

Zabalía, M. (2004). Espaces psychiques et cognition de l'espace chez des enfants atteints d'infirmité motrice d'origine cérébrale. *Neuropsychiatrie de L'enfance et de L'adolescence*, 52(3), 160–165.

Zinkstok, J., & Amelsvoort, T. van. (2005). Neuropsychological profile and neuroimaging in patients with 22q11. 2 deletion syndrome: a review keywords. *Child Neuropsychology*, 11(1), 21–37.

Zuidhoeck, S. (2015). The role of attention and executive brain functions in seeing and behavior in children with CVI. In Dutton, G., Lueck, A., *Vision and the Brain: Understanding Cerebral Visual Impairment in children*. New York: AFB Press.

Zuidhoeck, S., Hyvarinen, L., Jacob, N., Henriksen, A. (n.d.). Assessment of functional vision: assessment of visual processing in children with CVI. In Dutton, G.N & Lueck, A.H., *Vision and the Brain: Understanding Cerebral Visual Impairment in children*. New York: AFB Press.